

文章编号: 1000-0550(2014)01-0110-08

靖边潜台奥陶系马五₄亚段白云化作用研究^①

胡光明^{1,2} 罗顺社^{1,2} 倪超³ 肖红平⁴

(1. 长江大学地球科学学院 湖北荆州 434023; 2. 油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学) 湖北荆州 434023;
3. 中国石油天然气股份有限公司杭州地质研究院 杭州 310023; 4. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院天然气地质所 河北廊坊 065007)

摘要 从靖边潜台奥陶系马五段主要岩石类型出发,综合分析沉积特征和地球化学特征,认为靖边潜台奥陶系存在三种白云化作用:(1)泥粉晶云岩与硬石膏共生,形成于盐度较高的局限蒸发潮坪,为准同生白云化所形成;(2)粗粉晶云岩分布较局限,夹于与硬石膏共生的泥粉晶云岩层之间,不与硬石膏共生,但低有序度和略富钙的特征表明其为回流渗透白云化成因;(3)岩溶风化壳较发育区的孔洞缝中大量次生方解石的残余组构表明,去白云化之前的白云石以细砂晶为主,多为自形、半自形菱面体,部分具有环带构造和“亮边雾心”,形成温度为52.30℃~78.05℃,碳氧同位素特征与典型的埋藏白云石较接近,说明其为浅—中埋藏环境下形成的白云石。这三种白云化作用中,准同生白云化是最主要最普遍的白云化类型,其次是浅—中埋藏白云石,回流渗透白云化分布较局限。明确马五₄亚段的白云化类型,对于重建岩相古地理、研究储层的形成机理、提高勘探的成功率有重要意义。

关键词 准同生白云化 回流渗透白云化 埋藏白云化 靖边潜台 马五₄亚段

第一作者简介 胡光明 男 1977年出生 副教授 沉积层序与储层 E-mail: hugm@yangtzeu.edu.cn

中图分类号 P588.24+5 **文献标识码** A

鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组马五段白云岩是长庆油田重要的天然气储集层,厘清其白云岩的成因对于重建岩相古地理、研究储层的形成机理、提高勘探的成功率有重要意义。关于该段白云岩的成因,自1998年以来一直是学界讨论的热点问题,几乎所有白云化成因都涉及到了^[1~8],但一直未能形成较为统一的认识。本文选取靖边潜台奥陶系马五₄亚段,结合地化特征分岩性来对这一问题进行讨论。

1 地质背景

研究区位于鄂尔多斯盆地中北部,北到乌审召,南至高桥,西至王洼子,东至横山,面积约3.8×10⁴ km²,在构造单元上属于伊陕斜坡,在奥陶系古地貌上大致处于伊盟隆起和庆阳隆起之间,包括米脂凹陷的一部分(图1)。

研究的目的是层为奥陶系马家沟组马五₄亚段,从下向上大致可以分为马五₄³、马五₄²和马五₄¹三个小层,为热带海洋环境下的克拉通台地陆表海碳酸盐岩和蒸发岩沉积^[2]。在奥陶纪末,加里东运动导致台地整体抬升,形成了包括马五₄在内的古岩溶风化壳储层;晚石炭世台地再次沉降接受沉积,逐渐进入碎屑岩沉积时代。

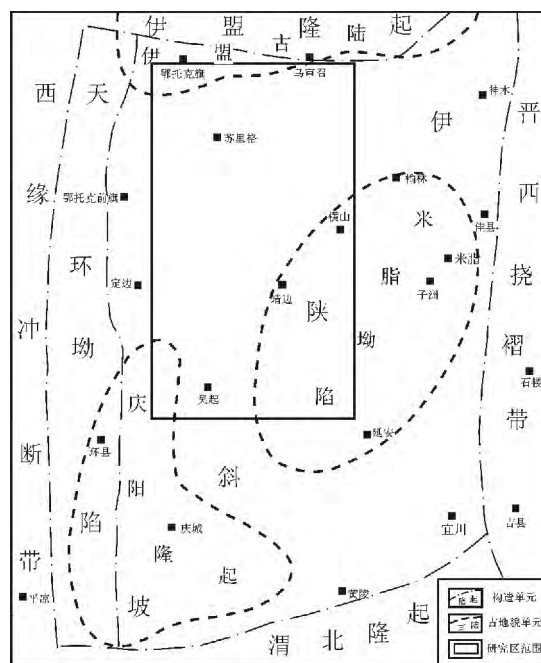


图1 研究区构造位置及古地貌背景

Fig. 1 Tectonic position and paleogeomorphic background of the study area

马五₄亚段在沉积和成岩过程中,形成了三大类岩石,一是与硬石膏共生的泥粉晶云岩,二是粗粉晶

^①国家自然科学基金项目(批准号:41172105)与湖北省自然科学基金(编号:2011CDB002)联合资助
收稿日期:2012-07-04;收修改稿日期:2012-10-25

云岩,三是岩溶层中的次生灰岩,其去白云化之前也是白云岩。这三类岩石代表了该区不同的白云化类型。

2 泥粉晶云岩的成因

2.1 岩性特征及其分布

根据硬石膏的产状,可将与硬石膏共生的泥粉晶云岩划分为三种:含硬石膏晶体泥粉晶云岩、含球状硬石膏结核泥粉晶云岩、块状硬石膏质泥粉晶云岩(图 2)。

这三种岩石中,作为基质的泥粉晶白云石,粒径一般在 0.005 mm 以下,晶粒细小,晶形不明显,并含有少量的黏土或有机质,与硬石膏晶体和球状硬石膏结核共生的泥粉晶云岩多为土黄色、黄白色,颜色较浅,与块状硬石膏共生的泥粉晶云岩多为灰色、灰黑色,颜色较深。硬石膏晶体为柱状,一般以硬石膏晶体印痕或假晶的形式出现,这种硬石膏较少,仅在研究区西部地层尖灭线附近零星分布。球状硬石膏结核为粒径 1~5 mm 的球形,硬石膏溶解后留下球形膏模孔,部分膏模孔被其他物质完全充填或半充填,内部常见示顶底构造,这种球状硬石膏结核极为普遍,主要以层状分布在研究区的中西部(图 3)。块状硬石膏形态较多,包括瘤状、铁丝鸡笼状、鸡雏状、层状、透镜状等,统称块状,分布于研究区的中东部(图 3)。

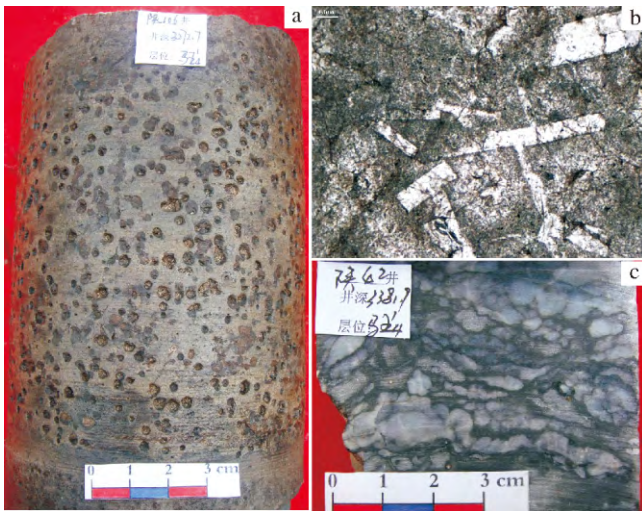


图 2 与硬石膏共生的泥粉晶云岩

a. 含球状硬石膏结核泥粉晶云岩, 陕 106 井, 马五₄ 3 272.7 m; b. 含硬石膏晶体泥粉晶云岩, 召 11 井, 马五₄ 3 254.5 m, 单偏光; c. 瘤状硬石膏质泥粉晶云岩, 陕 42 井, 马五₄ 3 381.7.5 m。

Fig. 2 Micritic and silt-sized crystal dolomite associated with anhydrite

2.2 沉积环境与白云岩成因

已有的古地磁研究表明,鄂尔多斯盆地所在的华北地块在奥陶纪处于近赤道的低纬度地区^[9],另外,根据 Couch 公式^[8,9]利用 B 含量计算出马五₃、马五₂和马五₁的古盐度分别为 10.1‰、11.4‰、12.1‰,远高于正常海水的盐度,且马家沟期蒸发岩发育。这些特征说明当时的研究区气候炎热干燥,水体盐度高,蒸发量大。

研究区西部地层尖灭线附近的硬石膏晶体代表了暴露的蒸发潮坪环境,中西部的球状硬石膏结核代表了时而暴露时而淹没的蒸发潮坪环境,中东部的块状硬石膏,代表了局限蒸发潮间洼地的水下沉积环境。从西向东,由暴露到水下,由硬石膏晶体到球状硬石膏结核再到块状硬石膏(图 3),硬石膏的含量逐渐增加,水体的盐度越来越大。

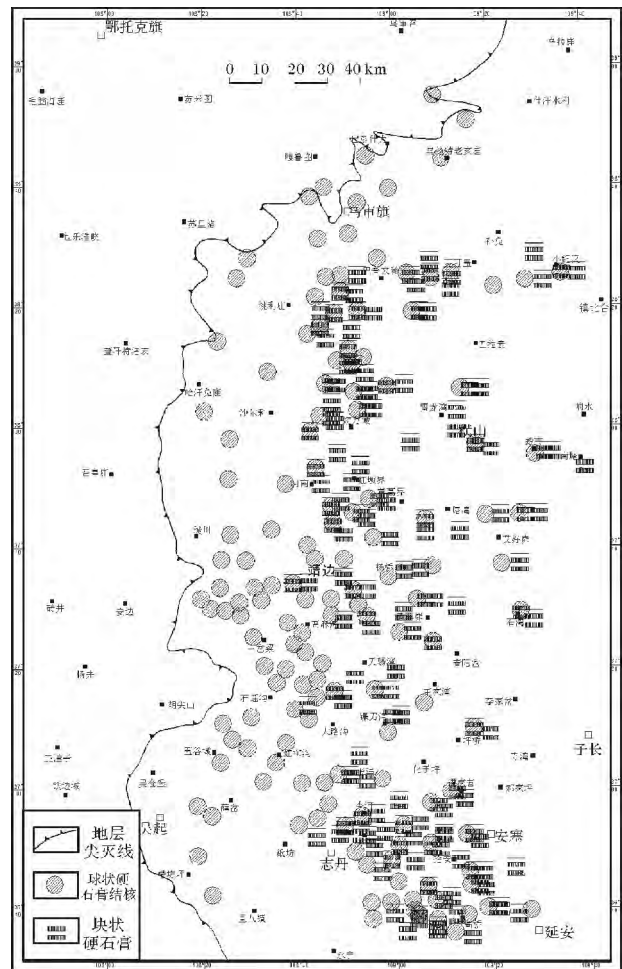


图 3 马五₄ 亚段球状硬石膏结核与块状硬石膏平面分布

Fig. 3 The distribution of spherical anhydrite concretion and massive anhydrite in Majiagou5₄ sub-member

表 1 马五₄ 亚段白云岩 X 衍射特征Table 1 Dolomite X ray diffraction characteristics in Majiagou₅ sub-member

岩石类型	样品数	有序度 (最小~最大/平均)	CaCO ₃ (mol/%) (最小~最大/平均)	Ca/Mg (最小~最大/平均)
含硬石膏结核泥粉晶云岩(基质)	3	0.65~0.70/0.68	49.71~51.00/50.56	0.99~1.04/1.02
粗粉晶云岩	5	0.57~1.00/0.71	49.63~50.76/50.03	0.99~1.03/1.00

另外,研究区泥粉晶云岩中发育大量的席状、小型波状藻纹层和水平层理,部分与块状硬石膏共生,但不与球状硬石膏结核和硬石膏晶体共生,代表了水下低能蒸发环境;在部分岩芯中也见到反映暴露环境的泥裂构造。

综合来看,该区具有局限蒸发潮坪的特点,是形成准同生白云岩的有利场所。

在局限蒸发潮坪环境中,蒸发泵作用使得水体盐度升高,石膏沉淀, Mg²⁺ 富集,高盐度下离子快速结晶形成晶粒较小的文石,文石在富 Mg²⁺ 的环境中发生准同生白云化,形成的白云石仍以泥晶和粉晶为主,最终形成泥粉晶云岩与硬石膏共生,这是准同生白云化作用的结果。而泥粉晶云岩与硬石膏共生的现象几乎遍及全区(图 3),说明马五₄ 亚段的准同生白云化具有普遍性。

3 粗粉晶云岩特征及其成因

马五₄ 亚段的粗粉晶云岩,不与硬石膏共生,手感表明其粒度比与硬石膏共生的泥粉晶云岩稍粗,镜下观察其粒径一般在 0.03~0.01 mm,呈块状,且极少见到岩溶现象,相对于与硬石膏共生的泥粉晶云岩,其分布不具有普遍性,一般夹于与硬石膏共生的泥粉晶云岩层之间。这些特征说明,粗粉晶云岩的成因与硬石膏共生的泥粉晶云岩(即准同生白云岩)有所不同。

为了增强对比性,取含球状硬石膏结核泥粉晶云岩的基质部分(即准同生白云岩 3 块)和粗粉晶云岩(5 块)样品送往国土资源部西南矿产资源监督检测中心进行 X 衍射分析,测定白云石的有序度和 MgCO₃ 的摩尔浓度,并根据相关公式^[7,12] 计算 CaCO₃ 的摩尔浓度和 Ca/Mg。统计分析结果(表 1)表明:两类白云石的有序度均较低,但粗粉晶云岩的略高,且两类白云岩均部分略富钙,富钙程度也非常接近。

晶格钙层中的部分 Ca²⁺ 被 Mg²⁺ 所取代或镁层中的部分 Mg²⁺ 被 Ca²⁺ 所取代,都将降低白云石晶体的有序度^[13],在盐度较高的环境中,干扰离子多,离子的结晶速度快,这种离子被取代的现象更容易发

生,有利于形成有序度较低的白云石,含硬石膏结核的泥粉晶云岩的有序度较低正印证了这一点。而粗粉晶云岩的有序度仅略高于泥粉晶云,说明粗粉晶云岩也是形成于盐度较高的环境中。

已有的研究表明,白云石的有序度与其云化机制有关,准同生白云石化形成的白云石有序度最低,次之为回流渗透白云石化形成的白云石有序度,混合白云石化形成的白云岩中白云石有序度较好,埋藏白云石化形成的白云岩中白云石有序度最好^[14],这种现象也间接说明有序度与盐度有关,也为解释粗粉晶云岩的有序度比含硬石膏结核的泥粉晶云岩略高提供了可能的依据。

另外,本区粗粉晶云岩与准同生云岩的富钙程度也几乎一致,也说明粗粉晶云岩是形成于盐度较高的环境中。

高盐度,且为粗粉晶,不与硬石膏共存,夹于与硬石膏共生的泥粉晶云岩层之间,这些特点与回流渗透白云化形成的白云岩是一致的。但粗粉晶云岩的分布远较含硬石膏结核的泥粉晶云岩局限,说明回流渗透白云化不具有普遍性。

4 次生灰岩去白云化之前的白云化过程

在加里东运动造成长达 1.3 亿年的构造抬升过程中,奥陶系的顶面经历了风化、剥蚀和溶蚀作用,形成了鄂尔多斯盆地地下古生界最主要的不整合面及风化壳储集层^[15]。在本区中西部马五₄ 亚段古岩溶风化壳的孔洞缝中存在大量次生方解石,部分甚至形成一定规模构成了次生灰岩。

4.1 岩石学特征

本区的去白云化作用比较常见,主要表现为白云石晶粒被细小方解石晶体组成的聚合体交代,方解石聚合体的形态、大小和内部残余结构能很好的反映去白云化之前的白云石的特征。具有完整和比较完整菱面体外形的次生方解石聚合体(图 4a, b, c),代表了自形、半自形的菱形白云石晶体,自形程度较高,且晶体之间呈直面接触;从方解石聚合体的大小可以判断白云石晶体一般为 0.08~0.03 mm,少数为 0.10

~0.15 mm,多数属于细砂晶,少数为粗粉晶,晶粒较粗大(图 2);从方解石聚合体中残余组构可以看出白云石具有明显的环带构造(图 4b, e, f);部分残余组构

还显示白云石具有模糊的“亮边雾心”特征(图 4a, b);未见任何马鞍形的次生方解石聚合体。这些特征与浅一中埋藏环境下形成的白云石的特征^[16]完全一致。

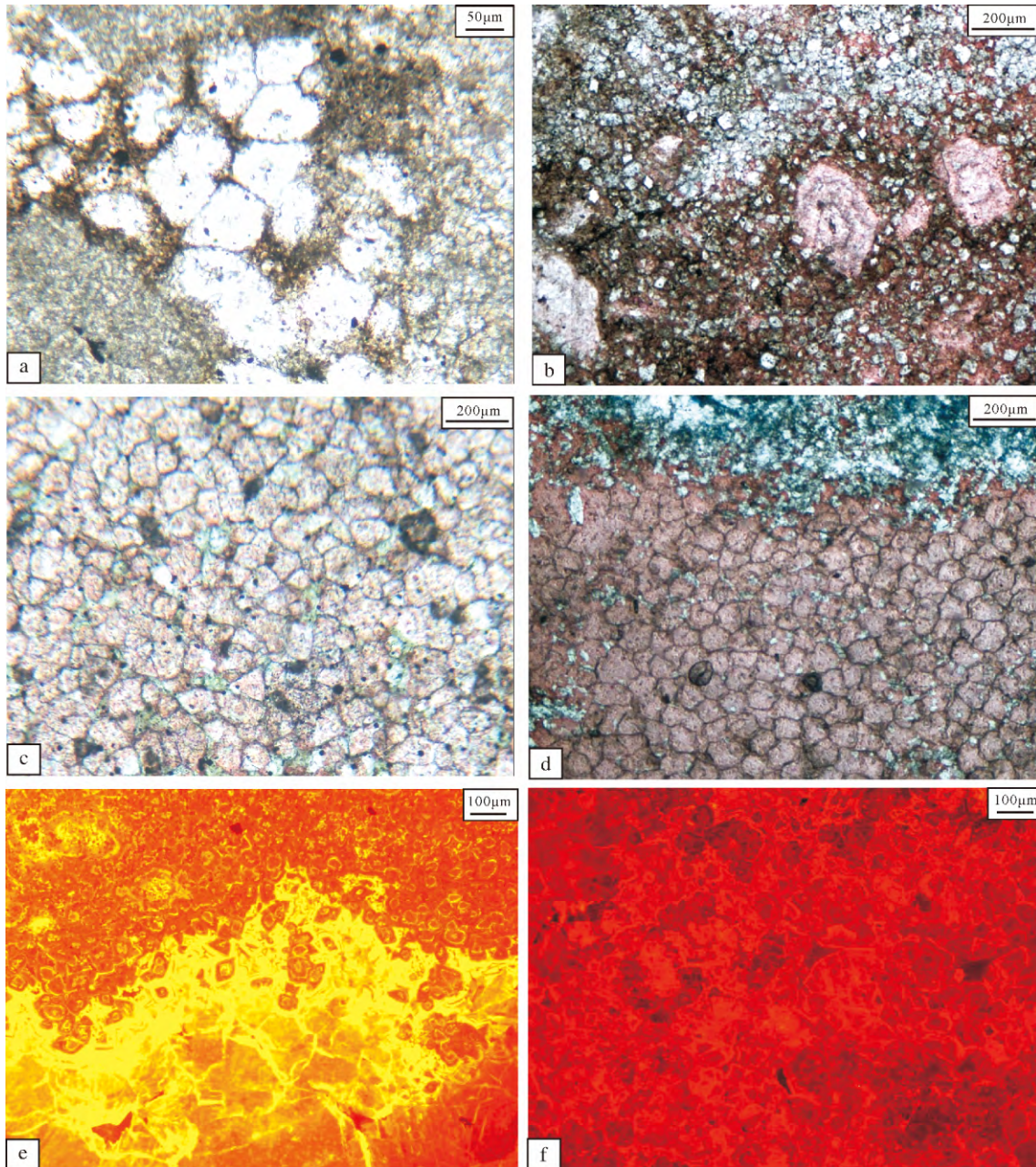


图 4 孔洞缝中次生方解石聚合体特征

a. 溶孔中菱形次生方解石聚合体,原“亮边雾心”特征隐约可见,原晶体直面对接触。陕 361 井,马五₄ 3 905.85 m,单偏光;
 b. 次生方解石与残余白云石共生,个别次生方解石聚合体粒径达到 0.12 ~ 0.15 mm,见残余的环带构造和“亮边雾心”特征,残留的白云石多为粗粉晶级,自形程度高,晶面较干净。统 15 井,马五₄ 3 111.81 m,单偏光,染色;
 c. 次生方解石表面残余的白云石较多,类似“嵌晶结构”,残余白云石较明亮,部分次生方解石聚合体边缘较平直,陕 324 井,马五₄ , 4 011.71 m,染色;
 d. 次生方解石中残余的白云石极少,次生方解石聚合体呈镶嵌状。桃 10 井,马五₄ 3 658.90 m;
 e. 阴极发光下次生方解石中见完整的菱形环带构造。苏 7 井,马五₄ 3 496.68 m;
 f. 阴极发光下次生方解石中见不完整的菱形环带构造。桃 7 井,马五₄ 3 488.37 m。

Fig. 4 Secondary calcite aggregate characteristics in dissolution pore, hole and seam

表 2 马五₄ 亚段溶孔、溶缝和裂缝中包裹体测温数据Table 2 Inclusion temperature data from dissolution pore, seam and fracture in Majiagou₅ sub-member

样品来源	样品编号	深度 /m	到风化壳距离 /m	均一温度/°C		校正后的平均温度 /°C	平均温度 /°C
				范围	平均值		
溶孔	TRK-1	3 575.00	55.00	149.80 ~ 239.80	180.02	75.27	62.28
	TRK-2	3 841.86	17.06	114.30 ~ 214.50	164.40	52.31	
	TRK-3	3 602.00	73.00	139.60 ~ 201.60	164.80	59.26	
溶缝	TRF-1	3 528.00	8.00	118.70 ~ 230.60	176.61	73.24	68.90
	TRF-2	3 629.88	35.88	115.30 ~ 216.80	184.41	78.05	
	TRF-3	3 340.00	52.00	106.30 ~ 201.70	150.16	52.30	
	TRF-4	3 061.43	3.43	142.80 ~ 191.50	161.88	72.18	
裂缝	TLF-1	3 928.90	38.30	128.30 ~ 225.10	179.24	64.12	66.56
	TLF-2	3 111.98	23.78	145.30 ~ 185.80	160.17	68.99	

需要注意的是,不具有完整菱面体外形的方解石聚合体也较常见,但并不意味着其代表的白云石为他形。因为 Ca^{2+} 半径比 Mg^{2+} 大,在去白云化程度较高的情况下, Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 之间是等摩尔交代形成的方解石聚合体的体积比被交代的白云石晶粒大,导致次生的方解石聚合体的边缘相互嵌合挤压而变形,不具有完整的菱面体外形^[17]。而具有完整和较完整菱面体外形的方解石聚合体,其去白云化的程度较低,次生方解石与白云石晶粒之间发生的是等体积交代,白云石的菱面体外形得到较好的保存。等摩尔交代往往表现为方解石聚合体中残留的白云石极少(图 4d),而等体积交代则残留白云石相对较多,形成“嵌晶结构”(图 4c),这种差异正说明二者的去白云化程度不同。

4.2 包裹体温度特征

针对上述产于孔洞缝中的白云石,分别在溶孔、溶缝和裂缝的方解石中选取包裹体,送国土资源部西南矿产资源监督检测中心检测其均一温度。选取的流体包裹体大小在 2~20 μm ,形态不规则,均为盐水气液包裹体,气液比 $\leq 15\%$,检测环境温度为 23°C,湿度为 40%,实验仪器为 LINKAM THMS600 型冷热台。

检测数据显示(表 2),溶孔、溶缝和裂缝中的均一温度没有显著差别,说明溶孔、溶缝和裂缝中的包裹体是同一温度条件下形成的。根据文献[8,18]提供的方法,结合地温梯度对均一温度进行校正,校正后的温度为 52.30°C~78.05°C,平均值为 66.19°C,根据国家石油天然气行业标准(SY/T 5478-2003)中碳酸盐岩各成岩阶段的指标判断,这一温度范围属于早成岩阶段,即去白云化之前的白云石形成于浅一中埋藏环境,这一结论与前述根据岩石学特征作出的判

断一致。

任战利等(2007)计算的地温梯度为 2.93°C/100 m^[19],假设当时地表温度为 30°C(蒸发环境),而白云岩形成的平均温度为 66.19°C,据此可推算形成此类白云石的浅一中埋藏环境的深度约为 1 235 m,大致相当于下奥陶统马五₄段到上奥陶统背锅山组的地层厚度,即白云岩形成于加里东运动导致构造抬升、形成风化壳之前。

4.3 碳、氧同位素特征

去白云化过程中的流体主要是大气降水溶解地层中的硬石膏所形成的富 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 溶液,这一流体有别于先前白云化的流体,所以次生方解石中的碳氧同位素能不能代表白云石先质的碳氧同位素,取决于这种流体对次生方解石中碳氧同位素的影响程度。取孔洞缝中的次生方解石,检测其碳、氧同位素含量(表 3),通过比较来研究其碳氧同位素的分布特征。

由于埋藏温度效应和大气淡水作用均会导致岩石中氧同位素比同期原始海水中的氧同位素偏负^[20~22],前述岩石学特征和包裹体均一温度分析表明,先前的白云石形成于浅一中埋藏环境,如果这一结论正确,先前白云石中氧同位素应该比奥陶纪海水偏负,再经过后期大气淡水作用去白云化,次生方解石中的氧同位素应该更加偏负。将本区次生方解石中碳氧同位素与鄂尔多斯盆地中央气田马五段埋藏白云岩的碳、氧同位素^[1]进行比较,发现前者确实有部分样品的碳氧同位素比后者更加偏负(图 5)。同时,与鄂尔多斯盆地宜川—黄龙地区马五段风化壳中的淡水改造的次生方解石的氧同位素^[23]比较,本区次生方解石中部分氧同位素也显得略微更加偏负(图 5)。综合起来看,埋藏温度效应和大气淡水作用的叠加改造是本区氧同位素偏负的主要原因,埋藏温

度效应是存在的。

表 3 马五₄ 亚段孔洞缝中次生方解石的碳、氧同位素分析数据

Table 3 Carbon and oxygen isotope data of secondary calcite in dissolution pore, hole and seam in Majiagou5₄ sub-member

样品编号	层位	深度 /m	到风化壳 距离/m	$\delta^{13}C_{PDB}$ /‰	$\delta^{18}O_{PDB}$ /‰
CO-11	马五 ₄ ¹	4 099.52	8.52	0.10	-8.18
CO-12	马五 ₄ ¹	3 378.33	50.93	0.70	-7.68
CO-14	马五 ₄ ¹	3 341.20	53.20	0.89	-7.54
CO-15	马五 ₄ ¹	3 162.00	36.60	0.85	-8.11
CO-16	马五 ₄ ¹	3 560.00	40.00	-1.71	-9.52
CO-17	马五 ₄ ¹	3 730.80	24.40	0.46	-8.43
CO-19	马五 ₄ ¹	3 928.90	40.30	0.38	-8.06
CO-20	马五 ₄ ¹	3 528.00	57.80	-0.04	-8.46
CO-21	马五 ₄ ¹	3 733.42	27.02	0.41	-8.62
CO-22	马五 ₄ ¹	3 629.88	35.88	0.01	-8.88
CO-24	马五 ₄ ¹	3 496.68	0.68	-0.60	-8.07
CO-26	马五 ₄ ¹	3 488.47	41.07	0.79	-6.87
CO-28	马五 ₄ ¹	3 134.08	17.08	-0.53	-8.29
CO-29	马五 ₄ ¹	3 272.78	2.78	-0.86	-9.44
CO-49	马五 ₄ ¹	4 011.71	18.51	-2.62	-12.45
CO-54	马五 ₄ ¹	3 400.55	10.75	-0.03	-8.56
CO-64	马五 ₄ ¹	3 992.00	31.60	0.76	-7.51
CO-65	马五 ₄ ¹	3 108.84	20.84	0.41	-8.45
CO-66	马五 ₄ ¹	3 037.00	50.80	0.47	-8.50
CO-68	马五 ₄ ¹	3 443.80	23.30	0.02	-8.03
CO-70	马五 ₄ ¹	3 587.70	58.70	0.87	-7.94
CO-34	马五 ₄ ²	3 841.86	17.06	-1.41	-9.54
CO-35	马五 ₄ ²	3 682.20	0.40	0.93	-7.39
CO-36	马五 ₄ ²	3 486.40	5.20	-0.26	-8.47
CO-39	马五 ₄ ²	3 413.42	23.62	-1.70	-10.41
CO-56	马五 ₄ ²	2 958.30	2.30	-1.96	-9.84
CO-58	马五 ₄ ²	3 602.00	73.00	-2.46	-10.01
CO-40	马五 ₄ ³	3 931.50	19.00	-1.74	-8.23
CO-41	马五 ₄ ³	3 581.85	31.55	0.46	-7.91
CO-42	马五 ₄ ³	3 061.43	3.43	-1.67	-8.81
CO-45	马五 ₄ ³	3 668.30	2.30	-1.39	-8.35
CO-46	马五 ₄ ³	3 583.40	33.10	-0.53	-7.45
CO-69	马五 ₄ ³	3 735.20	11.70	-0.04	-8.26

再从碳同位素来看,本区次生方解石中碳同位素值与中央气田埋藏白云石的碳同位素值非常接近,而与宜川—黄龙风化壳中次生方解石的碳同位素值明显不同(图 5)。在成岩过程中的¹²C 与¹³C 之间的交换作用比¹⁶O 与¹⁸O 的交换要弱得多^[24],所以碳同位素能更多的保存白云石先质的特点,据此判断,本区的次生方解石在去白云化之前是在埋藏环境中形成的。

4.4 白云化和去白云化的过程

在马五₄ 沉积以后,台地继续沉降,接收中晚奥

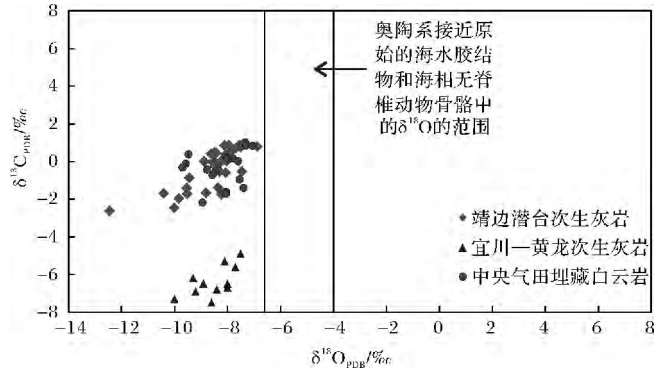


图 5 靖边潜台马五₄ 亚段孔洞缝中次生方解石的碳、氧同位素分布特征

(奥陶系海水、宜川—黄龙次生灰岩和中央气田埋藏白云石的碳氧同位素值分别来自文献[22], [23]和[1])

Fig. 5 Carbon and oxygen isotope characteristics of secondary calcite in dissolution pore, hole and seam in Majiagou5₄ sub-member in Jingbian platform

陶世的沉积,而在这一过程中马五₄ 逐渐进入浅—中埋藏环境,在上覆地层的压力作用下,逐渐形成裂缝、溶缝、溶孔,准同生阶段形成的大量富余的高镁封存水^[7] 释放到孔洞缝中汇聚,形成埋藏白云石。

在奥陶纪末,加里东运动造成台地抬升、风化,形成风化壳,而本区中西部马五₄ 亚段到风化壳顶面的最大距离不超过 100 m,受到大气淡水的影响。与作为基质的泥粉晶云岩相比,浅—中埋藏阶段形成的孔洞缝具有更好的渗透性,成为大气淡水溶解地层中的硬石膏后汇聚的主要场所,硬石膏的溶解使孔洞缝中的流体富含 Ca²⁺ 和 SO₄²⁻,促使孔洞缝中的白云石发生去白云石化,形成次生方解石。

5 结束语

靖边潜台奥陶系马家沟组马五₄ 亚段主要发育泥粉晶云岩、粗粉晶云岩,在岩溶较发育的中西部还发育有大量白云石去白云化形成的次生方解石,部分甚至构成了次生灰岩,针对这三种岩石开展了白云化作用研究,得到以下结论:

(1) 泥粉晶白云岩包括含硬石膏晶体泥粉晶云岩、含球状硬石膏结核泥粉晶云岩、块状硬石膏质泥粉晶云岩等三种,典型特征为晶粒细小、与硬石膏共生,在全区广泛分布,是在高盐度的局限蒸发湖中,通过准同生白云化形成的,准同生白云化是马五₄ 亚段最主要的白云化作用。

(2) 粗粉晶云岩晶粒稍粗,粒径一般在 0.03 ~

0.01 mm 平均有序度为 0.71,比泥分晶云岩略高,部分略富钙,富钙程度与泥粉晶云岩基本一致,说明粗粉晶云岩也是在高盐度环境中,离子快速结晶而成,但粗粉晶云岩分布较局限,不与硬石膏共生。综合这些特征认为粗粉晶云岩是回流渗透白云化形成的,这种白云化类型不具有普遍性。

(3) 风化壳中的次生方解石聚合体的残余组构反映去白云化之前的白云石晶粒较粗,晶体多为自形、半自形,晶体直接触,部分具有环带构造和“亮边雾心”,无马鞍形白云石,校正后的包裹体温度为 52.30℃~78.05℃,且与马五段埋藏白云石和次生灰岩相比较,氧同位素更加偏负,碳同位素与埋藏白云石接近,这些特征说明其为浅—中埋藏环境形成的白云石,后来再在抬升风化期发生去白云化形成次生方解石。这种白云化仅分布于本区中西部风化壳的孔洞缝中。

参考文献 (References)

- 王保全, 强子同, 张帆, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组马五段白云石的同位素地球化学特征[J]. 地球化学, 2009, 38(5): 472-479 [Wang Baoquan, Qiang Zitong, Zhang Fan, *et al.* Isotope characteristics of dolomite from the fifth member of the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin[J]. *Geochimica*, 2009, 38(5): 472-479]
- 姚泾利, 王保全, 王一, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶统马家沟组马五段白云石的地球化学特征[J]. 沉积学报, 2009, 27(3): 281-289 [Yao Jingli, Wang Baoquan, Wang Yi, *et al.* Geochemical characteristics of dolomites in Lower Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(3): 281-289]
- 刘德良, 孙先如, 李振生, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系白云石碳氧同位素分析[J]. 石油实验地质, 2006, 28(2): 155-160 [Liu Deliang, Sun Xianru, Li Zhensheng, *et al.* Analysis of carbon and oxygen isotope on the Ordovician dolostones in the Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2006, 28(2): 155-160]
- 黄擎宇, 张峭楠, 丁晓琪, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系马家沟组白云石成因研究[J]. 石油实验地质, 2010, 32(2): 147-158 [Huang Qingyu, Zhang Shaonan, Ding Xiaoqi, *et al.* Origin of dolomite of Ordovician Majiagou Formation, western and southern margin of the Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(2): 147-158]
- 彭军, 田景春. 陕甘宁盆地中部气田中区马五 4 段白云石成因类型及其地球化学特征[J]. 矿物岩石, 1998, 18(2): 35-39 [Peng Jun, Tian Jingchun. Geochemical characteristics and origin types of dolostones in the fourth sub-member of fifth member of Majiagou formation from the middle area of the middle part of gas field of Shan-guan-ming basin [J]. *Journal of Mineralogy & Petrology*, 1998, 18(2): 35-39]
- 陈志远, 马振芳, 张锦泉. 鄂尔多斯盆地中部奥陶系马五 5 亚段白云石成因[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(6): 20-22 [Chen Zhiyuan, Ma Zhenfang, Zhang Jinquan. Genesis of the dolomite in Ma5 subinterval, Ordovician in central Ordos basin [J]. *Petroleum Exploration & Development*, 1998, 25(6): 20-22]
- 张永生. 鄂尔多斯地区奥陶系马家沟群中部块状白云石的深埋藏白云石化机制[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 424-429 [Zhang Yongsheng. Mechanism of deep burial dolomitization of massive dolostones in the middle Majiagou Group of the Ordovician, Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(3): 424-429]
- 苏中堂, 陈洪德, 徐粉燕, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组白云石地球化学特征及白云石化机制分析[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 22-36 [Su Zhongtang, Chen Hongde, Xu Fenyan, *et al.* Geochemistry and dolomitization mechanism of Majiagou dolomites in Ordovician, Ordos, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 22-36]
- 黄宝春, 周姚秀, 朱日祥. 从古地磁研究看中国大陆形成与演化过程[J]. 地学前缘, 2008, 15(3): 348-355 [Huang Baochun, Zhou Yaoliu, Zhu Rixiang. Discussions on Phanerozoic evolution and formation of continental China, based on Paleomagnetic studies [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(3): 348-355]
- Walker C T. Evaluation of boron as a paleosalinity indicator and its application to offshore prospects[J]. *AAPG Bulletin*, 1968, 52: 751-766
- Couch E L. Calculation of paleosalinities from boron and clay mineral data[J]. *AAPG Bulletin*, 1971, 55: 1829-1839
- 曾理, 万茂霞, 彭英. 白云石有序度及其在石油地质中的应用[J]. 天然气勘探与开发, 2004, 27(4): 64-66 [Zeng Li, Wan Maoxia, Peng Ying. Dolomite sequentiality and its application to petroleum geology [J]. *Natural Gas Exploration & Development*, 2004, 27(4): 64-66]
- 邓敏, 钱光人, 唐明述. 白云石晶体的有序度与去白云石化反应[J]. 南京化工大学学报, 2001, 23(1): 1-2 [Deng Min, Qian Guangren, Tang Mingshu. Ordered index and dedolomitization of dolomite crystals [J]. *Journal of Nanjing University of Chemical Technology*, 2001, 23(1): 1-2]
- 王小芬, 杨欣, 王起琼. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组白云石有序度研究[J]. 新疆石油天然气, 2011, 7(1): 14-15 [Wang Xiaofen, Yang Xin, Wang Qiqiong. Research on the order degree of dolomite of Ordovician Majiagou Group in Ordos Basin [J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2011, 7(1): 14-15]
- 左智峰, 王少飞, 石晓英. 陕甘宁盆地奥陶系白云石成因及储集性能[J]. 甘肃地质学报, 1997, 6(增刊): 70-83 [Zuo Zhifeng, Wang Shaofei, Shi Xiaoying. Dolomite genesis and reservoir property in Ordovician in Shanganning Basin [J]. *Acta Geologica Gansu*, 1997, 6(Suppl.): 70-83]
- 王丹, 陈代钊, 杨长春, 等. 埋藏环境白云石结构类型[J]. 沉积学报, 2010, 28(1): 18-20 [Wang Dan, Chen Daizhao, Yang Changchun, *et al.* Classification of texture in burial dolomite [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(1): 18-20]
- 张杰, 寿建峰, 文应初, 等. 去白云石化作用机理及其对储集层的改造[J]. 古地理学报, 2012, 14(1): 71-73 [Zhang Jie, Shou Jianfeng, Wen Yingchu, *et al.* Mechanism of dedolomitization and its rebuilding to reservoir [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(1): 71-73]

- 18 苏中堂. 鄂尔多斯盆地古隆起周缘马家沟组白云岩成因及成岩系统研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011 [Su Zhongtang. The study of dolomite genesis and diagenesis system of Majiagou Formation around Paleo-uplift, Ordos [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011]
- 19 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义[J]. 中国科学(D 辑): 地球科学, 2007, 37(增刊 1): 23-26 [Ren Zhanli, Zhang Sheng, Gao Shengli, et al. Structural evolution history and its reservoir formation significance of Ordos basin [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2007, 37 (Suppl. 1): 23-26]
- 20 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 54-58 [Huang Sijing. Diagenesis of Carbonate Rocks [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010: 54-58]
- 21 刘岫峰. 沉积岩实验室研究方法[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 220-221 [Liu Youfeng. Laboratory research methods of sedimentary rocks [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 220-221]
- 22 Allan J R, Wiggins W D. Dolomite reservoirs: Geochemical techniques for evaluating origin and distribution [M]. Tulsa: AAPG, 1993: 36-129
- 23 刘宝宪, 王红伟, 马占荣, 等. 鄂尔多斯盆地东南部宜川—黄龙地区马五段白云岩次生灰化作用特征与成因分析[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(5): 791-792 [Liu Baoxian, Wang Hongwei, Ma Zhanrong, et al. Secondary limestone action on Ma5 member dolomites in Yichuan-Huanglong region of southeastern Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(5): 791-792]
- 24 张秀莲. 碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度、古水温的关系[J]. 沉积学报, 1985, 3(4): 24-28 [Zhang Xiulian. Relationship between carbon and oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1985, 3(4): 24-28]

Dolomitization Research of Ordovician Majiagou 5₄ Sub-member, Jingbian Platform

HU Guang-ming^{1,2} LUO Shun-she^{1,2} NI Chao³ XIAO Hong-ping⁴

(1. School of Geoscience, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023;

2. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education (Yangtze University), Jingzhou, Hubei 434023;

3. Hangzhou Geological Research Institute of PetroChina, Hangzhou 310023;

4. Institute of Natural Gas, Langfang Branch, Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Langfang, Hebei 065007)

Abstract: In Jingbian platform, Ordovician Majiagou 5 member is an important natural gas reservoir in Changqing oil-field. But there exists a long argument about its dolomitization type. This issue has been discussed on the basis of Majiagou 5₄ sub-member. In this paper, after researching the sedimentary and geochemical characteristics of different rock types, the authors draw a conclusion that penecontemporaneous, reflux and burial dolomitization are main dolomitization types in this region. (1) Micritic and silt-sized crystal dolomite which is always associated with anhydrite, deposited in restricted and evaporative tidal flat with high salinity, and formed by penecontemporaneous dolomitization. (2) Coarser silt-sized crystal dolomite is distributed among the layers of micritic and silt-sized crystal dolomite with anhydrite, and its coarser crystal grain, lower degree of order and slightly richer calcium show that this type dolomite is formed by reflux dolomitization. (3) Much secondary calcite is spread in karst layer, and the metasomatism residual texture shows that the grain size of the dolomite before dedolomitization is mainly fine crystal, partially with euhedral-subhedral texture, zonal structure, and bright border with vague center. Their inclusion temperature span is from 52.30 °C to 78.05 °C, and the characteristics of carbon and oxygen isotopes are more similar to typical burial dolomites. All these indicate that the dolomite before dedolomitization is formed in shallow and middle-depth burial diagenetic environment. Clarifying the dolomitization type of Majiagou 5₄ sub-member is very important to rebuild lithofacies palaeogeographic, research the reservoir formation mechanism, and improve the success possibility of exploration.

Key words: penecontemporaneous dolomitization; reflux dolomitization; burial dolomitization; Jingbian Platform; Majiagou 5₄ Sub-member