

鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳储层内多期次 方解石的成因及其地质启示

任静¹, 苏中堂^{2,3}, 黄浩³, 高星^{4,5}, 吴浩文³, 魏柳斌^{4,5}, 裴文超^{4,5}

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059; 3. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 4. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018; 5. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710018)

摘要: 鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳储层受不同期次方解石影响,厘清方解石成因及其影响有助于明确储层形成机理。对盆地富县地区奥陶系风化壳膏模孔与溶缝内充填的方解石进行了矿物学、地球化学及同位素年代学分析,结果表明,方解石可分为白色原生方解石、红色次生方解石、白色次生方解石三类。其中,充填于膏模孔与溶缝内的白色原生方解石,溶孔方解石解理发育,溶缝方解石解理不发育,地球化学显示具有明显的Ce负异常,少数溶孔充填方解石具Eu正异常,阴极发光呈红色、橙红色,U-Pb年龄分别为 333.3 ± 3.3 Ma和 332.8 ± 3.5 Ma,表明该类方解石形成于早石炭世地表-近地表环境,石膏被大气淡水溶蚀形成 Ca^{2+} ,在膏模孔及溶缝处与富含 CO_3^{2-} 的大气淡水反应而成。红色方解石为交代白云石化次生方解石,多保留白云石晶型,地球化学显示高Mn、低Sr、高Sr同位素以及C、O同位素负偏的特征,阴极发光呈橘红色,未能获得定年数据,系地表-近地表环境中大气淡水等摩尔交代白云石晶体而成。白色次生方解石呈嵌晶状,中粒结构,解理发育,阴极发光呈橘红色,具有高Sr、高Sr同位素、Ce负异常、O同位素相对稳定、C同位素发生负偏的特征,U-Pb年龄为 212.0 ± 19.0 Ma,表明该类方解石在晚三叠世排烃期由酸性流体与 Ca^{2+} 反应而成。各类方解石是不同成岩阶段不同成岩流体的产物,易形成于相对低洼的滞水地带,导致岩石孔隙度降低,因此寻找有效储层应关注古岩溶地貌高部位。

关键词: 次生方解石; 去白云石化作用; 岩溶作用; 风化壳储层; 方解石定年

中图分类号: P578.6⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)02-0345-16

Diagenesis of multi-stage calcites in the Ordovician weathered crust reservoir of the Ordos Basin and its geological implications

REN Jing¹, SU Zhong-tang^{2,3}, HUANG Hao³, GAO Xing^{4,5}, WU Hao-wen³, WEI Liu-bin^{4,5}
and PEI Wen-chao^{4,5}

(1. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation(Chengdu University of Technology), Chengdu 610059, China; 3. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 4. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China; 5. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil and Gas Fields, Xi'an 710018, China)

收稿日期: 2024-01-24; 接受日期: 2024-05-20; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中国石油长庆油田重大科技专项(CQZDZX2021); 中石油攻关性应用性科技专项(2023ZZ16YJ01)

作者简介: 任静(2001-),女,硕士生,地质学专业,E-mail: 3285863572@qq.com; 通讯作者: 苏中堂(1981-),男,教授,从事碳酸盐岩沉积学教学与科研工作,E-mail: suzhongtang2012@cdut.cn。

网络首发时间: 2024-09-27; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20240927.1541.002.html>

Abstract: The Ordovician weathered crust reservoir in the Ordos Basin is affected by calcites of different stages, so clarifying the genesis and influence of calcites can help to understand the mechanism of reservoir formation. Mineralogical, geochemical and isotope chronological results of calcites from the Ordovician weathered crusts in the Fuxian area of the Ordos Basin demonstrate that these calcites can be divided into white primary calcite, red secondary calcite and white secondary calcite. The white primary calcite filled in the pores and crevices of the paste mold, whereas the cleavage of calcite in the dissolved pores is much more developed than those in the dissolved seams. Geochemistry shows obvious negative Ce anomalies, a few calcites filled in the pores have positive Eu anomalies. They have red and orange-red cathodoluminescence, and their U-Pb ages are 333.3 ± 3.3 Ma and 332.8 ± 3.5 Ma, respectively, indicating that this type of calcite was formed in the early Carboniferous near surface environment. Gypsum was dissolved by atmospheric freshwater to form Ca^{2+} , which reacted with atmospheric freshwater rich in CO_3^{2-} at the gypsum mold pores and dissolution fractures. Red calcite is the secondary calcite of metasomatic dedolomitization, with dolomite crystal type mostly and orange-red cathodoluminescence. It is formed by metasomatic dolomite crystals in the atmospheric freshwater equimolarly from surface to near-surface environment, with high Mn, low Sr, high Sr isotopes and negative C and O isotopes. White secondary calcite is poikilitic, and medium-grained crystals, with developed cleavage, orange-red cathodoluminescence, high Sr concentration and high Sr isotopes, negative Ce and C anomalies, relatively stable O isotope, and U-Pb age of 212.0 ± 19.0 Ma. The results indicate that this type of calcite was formed by the reaction of acidic fluids with Ca^{2+} during the Late Triassic hydrocarbon expulsion period. All kinds of calcite are the products of different diagenetic fluids in different diagenetic stages, which are easy to develop in the relative low-lying stagnant areas and result in the reduced rock porosity. Therefore, more attention should be paid to the high parts of paleo-karst geomorphology for effective reservoirs.

Key words: secondary calcite; dedolomitization; karst; weathered crust reservoir; calcite dating

Fund support: Petro China Changqing Oilfield Science and Technology Major Project (CQZDZX2021); PetroChina Key Technology R & D Program for Applied Research (2023ZZ16YJ01)

鄂尔多斯盆地油气资源丰富,奥陶系风化壳储层是下古生界天然气稳产保障,前人在其沉积、成岩、岩相古地理、岩溶风化壳及天然气成藏等方面研究颇丰(杨俊杰等,1992;冯增昭等,1999;付金华等,2006;苏中堂等,2011;马春生等,2011;王建民,2011;郭彦如等,2012;王建民等,2014;黄正良等,2015;董岩等,2017;包洪平等,2017,2023;杨鹏等,2021)。奥陶纪,鄂尔多斯盆地海侵规模和沉积范围逐步扩大,在盆地本部形成以马家沟组为主体的沉积地层,尤其是在盆地中东部地区形成了厚达600~900 m的碳酸盐岩与膏盐岩交互的旋回性沉积层;加里东运动使盆地整体抬升,中东部地区暴露地表经历长达1.5亿年的风化剥蚀和淋滤改造,从而使奥陶系顶部广泛发育碳酸盐岩风化壳储集层(王雪莲等,2005;黄道军等,2009;史基安等,2009)。硬石膏的高溶解度和力学不稳定性使得研究区以膏云岩、白云岩和灰云岩互层的风化壳储层以膏模孔、扩溶膏模孔及与之伴生的胀缩微裂缝为主要储集空间(舒鹏程等,2021),而孔洞充填程度

成为决定风化壳储层质量的重要因素之一(任军峰等,2012;张军涛等,2016,2021)。孔隙充填物主要有白云石、方解石、石英、硬石膏等,并且通常以两种及以上的矿物组合形式出现,其中白云石充填者储层物性较佳,而方解石充填者基本不具储集性(李国蓉等,1997;王建民,2011;沈扬等,2018)。风化壳储层内除了充填膏模孔的方解石,去白云石化作用形成的次生方解石也是损害储集性能的重要因子(Fairbridge, 1978;刘宝宪等,2011;李婧娟,2019;Su *et al.*, 2021)。风化壳储层内方解石明显损害储层质量(任军峰等,2012),研究充填方解石与次生方解石的成因,探讨不同方解石的形成序列,对深入认识风化壳储层形成过程、准确评价储层及提高预测准确度有重要意义(陈瑞银等,2006;黄道军等,2009;任军峰等,2012),但研究相对薄弱。

本文以鄂尔多斯盆地宜川-黄龙-富县地区马家沟组风化壳内膏模孔、溶缝充填白色方解石和红色、白色次生方解石为研究对象,在岩心观察基础上,对

方解石样品进行矿物学、岩石学、地球化学及年代学分析,研究充填方解石与次生方解石的成因,探讨不同方解石的形成序列,以期为深入认识风化壳储层形成过程和储量预测提供相关依据。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地作为华北板块西缘的一个构造变形弱、多旋回演化、多沉积类型的大型克拉通型盆地,赋存了极丰富的碳酸盐岩油气资源(杨俊杰等, 1992; 王禹诺等, 2015; 姚泾利等, 2015; 吴东旭等, 2023)。富县地区位于鄂尔多斯盆地东南部,沉积稳定且构造特征具有继承性。研究区内应力构造不发育,构造变化简单,以整体升降为主,周边已建成靖边气田、黄龙气田,具有重大勘探潜力(图 1a)。

奥陶纪时期,华北板块位于西伯利亚和冈瓦纳大陆之间,靠近赤道的中低纬度地区(王洪浩等, 2016); 马家沟期,盆地形成了碳酸盐-蒸发岩互层沉积。按岩性差异自下而上依次为马一至马六段,其中马一、三、五段形成于海退时期,主要发育白云岩与蒸发岩,为蒸发台地相和局限台地相沉积; 马二、四、六段则形成于海侵时期,主要发育灰岩,为开阔台地相沉积(冯增昭等, 1999; 包洪平等, 2017; 于洲等, 2017; 王起琮等, 2018)。马五段又可细分为 10 个亚段(马五 1~马五 10)(包洪平等, 2017), 风化壳储层主要发育在马五 1~马五 4 亚段(何江等, 2013; 图 1b)。

受加里东运动影响,盆地整体抬升,马家沟组碳酸盐岩长期暴露,受大气淡水淋滤作用改造,在其顶部形成约 0~70 m 厚的风化壳岩溶型储层(何自新等, 2005; 任军峰等, 2016, 2019, 2021; Xu *et al.*, 2021; Su *et al.*, 2021)。石炭纪开始,盆地再次接受沉积,风化壳储层逐渐被埋藏,上覆煤系地层压实过程中释放酸性流体进一步改造岩溶储层(黄道军等, 2009; 王建民, 2011; 吴保祥等, 2012; 沈扬等, 2018; He *et al.*, 2022)。中生代,盆地埋藏最深,烃源岩在晚三叠世—中侏罗世开始生油,早白垩世过成熟开始大规模生气,至晚白垩世—新生代,油气藏发生内部调整(任占利等, 2021)。

2 研究样品和方法

2.1 样品采集与制备

本文研究样品主要采集于鄂尔多斯盆地宜川-黄龙-富县地区,对研究区 29 口钻井取心进行系统观察,主要针对马五段采集典型研究样品,其中红色次生方解石样品主要来源于马五 1 亚段,少量来源于马五 2 亚段及马六段; 白色次生方解石主要来源于马五 2 亚段与马五 1 亚段; 溶孔充填方解石主要来源于马五 1 亚段与马五 2 亚段,溶缝充填方解石主要来源于马五 14 层与马五 7 亚段。将样品磨制多用薄片 150 片,并用茜素红将薄片染色 1/3 区分不同矿物,后续岩矿分析、地球化学分析、定年分析均在同一薄片上完成。

2.2 地球化学方法

方解石原位微量元素分析使用激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。激光剥蚀平台采用 Resolution SE 型 193 nm 深紫外激光剥蚀进样系统,配备 S155 型双体积样品池。质谱仪为 Agilent 7900 型电感耦合等离子体质谱仪,采用束斑直径 50 μm 、剥蚀频率 10 Hz、能量密度 3.5 J/cm²、扫描速度 3 $\mu\text{m/s}$ 的激光参数剥蚀 NIST612,调节气流以获得高的信号强度、低的氧化物产率(ThO/Th<0.2%)。选用 100 μm 束斑线扫 NIST 610 对待测元素进行 P/A 调谐。测量质量数 ²³Na、²⁵Mg、²⁷Al、²⁹Si、³¹P、⁴³Ca、⁴⁵Sc、⁴⁷Ti、⁵¹V、⁵²Cr、⁵⁵Mn、⁵⁷Fe、⁵⁹Co、⁶⁰Ni、⁶⁶Zn、⁶⁹Ga、⁸⁶Sr、⁸⁹Y、⁹⁰Zr、⁹³Nb、¹³⁷Ba、¹³⁹La、¹⁴⁰Ce、¹⁴¹Pr、¹⁴⁶Nd、¹⁴⁷Sm、¹⁵¹Eu、¹⁵⁷Gd、¹⁵⁹Tb、¹⁶³Dy、¹⁶⁵Ho、¹⁶⁶Er、¹⁶⁹Tm、¹⁷³Yb、¹⁷⁵Lu、¹⁷⁸Hf、¹⁸¹Ta、²⁰⁸Pb、²³²Th、²³⁸U,总的扫描时间约为 0.31 s。采用 5 个激光脉冲对每个剥蚀区域进行预剥蚀(剥蚀深度约 1 μm),以去除样品表面可能的污染。在束斑直径 38 μm 、剥蚀频率 10 Hz、能量密度 5 J/cm² 的激光条件下开展样品分析。数据处理采用 Iolite 程序,MACS-3 作为校正标样,610、612 作为监测标样,每隔 10~12 个样品点分析 2 个 MACS-3、610 和 1 个 612。通常采集 20 s 的气体空白,35~40 s 的信号区间进行数据处理,⁴³Ca 作为内标计算微量元素含量,内标值采用电子探针数据(谢博航等, 2023)。

2.3 U-Pb 定年方法

方解石 U-Pb 定年在四川创源微谱科技有限公司完成,将薄片放置到激光剥蚀样品池中,微调焦距使得图像清晰;固定激光能量为 2 J/cm^2 ,剥蚀时间为 20 s,按 $60 \text{ }\mu\text{m}$ -6 Hz、 $90 \text{ }\mu\text{m}$ -9 Hz、 $120 \text{ }\mu\text{m}$ -12 Hz、 $160 \text{ }\mu\text{m}$ -16 Hz 设置 4 个剥蚀点进行激光剥蚀;取出样品后将样品光斑放在 Zeiss LSM900 激光共聚焦显微镜下测量剥蚀坑的深度和宽度,计算样品的激光剥蚀速率($\mu\text{m}/\text{束次}$)和剥蚀坑的深宽比;根据样品信号确定最佳光斑大小,利用激光束对待测矿物进行点剥蚀,利用载气将剥蚀出的气溶胶带入等离子体质谱仪中,利用 Tune 调谐模式实时观察 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 、 ^{238}U 离子信号强度,根据信号强度情况更换光斑大小($60\sim 200 \text{ }\mu\text{m}$)直到找到适合本样品的光斑大小,确保 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 、 ^{238}U 离子信号强度显著强于背景且峰形符合正态分布;对比样品与标样 WC-1 的激光剥蚀效率的差异,在保证与 WC-1 具有一致的剥蚀坑深/宽比的原则下,计算得到适合本样品的光斑大小和激光频率;确定合理剥蚀参数后,按照标

样内插法设置激光剥蚀序列。为了节省标样,WC-1 固定采用 $60 \text{ }\mu\text{m}$ -6 Hz 的剥蚀参数;样品剥蚀参数采用前面确定的适合本样品的光斑大小和激光频率,NIST614 的剥蚀参数与样品的剥蚀参数保持一致,以保证对样品元素分馏的合理校正以及 U、Pb 含量的准确测定(刘恩涛等, 2019; 杨鹏等, 2021; 周进高等, 2022)。

3 研究结果

3.1 岩石学、矿物学特征

显微镜镜观察及阴极发光分析表明膏模孔和裂隙中充填白色方解石,溶孔方解石解理发育,溶缝内方解石解理不发育(图 2a、2b);溶孔溶缝充填方解石阴极发光主要呈红色,并且可见溶孔方解石阴极发光具有边界明亮、中心较暗的特征(图 2e、2f);次生灰岩颜色主要呈现红色-红白色-白色过渡,次生灰岩围岩为灰色-深灰色,次生方解石分为红色和白色,其中红色次生方解石保留白云石晶型,呈现中心

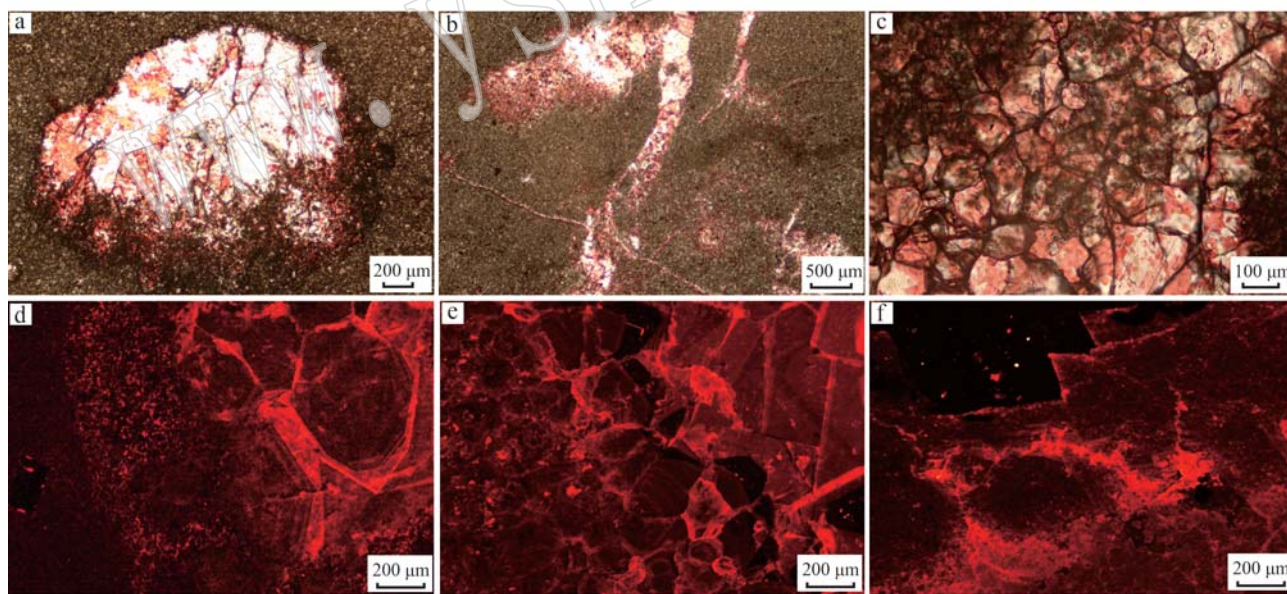


图 2 不同产状方解石矿物学特征

Fig. 2 Mineralogical characteristics of calcites with different production conditions

a—膏模孔充填方解石, FG4-3 076.8 m-马五 2 结核状膏模孔; b—溶缝充填方解石, FG7-2 970.5 m-马五 2 具溶缝、溶孔微晶云岩; c—红色次生方解石与白色次生方解石, FG7-2 971.8 m-马五 2 去云化微晶云岩; d—膏模孔充填方解石阴极发光, FG4-3 076.8 m; e—溶缝充填方解石阴极发光, FG7-2 971.8 m; f—次生灰岩阴极发光, 2 867.08 m

a—gypsum-mold filled calcite, FG4-3 076.8 m-Ma5 2 nodular gypsum-mold; b—fracture-cavity filled calcite, FG7-2 970.5 m-Ma5 2 microcrystalline dolomite with fracture-cavity and solution holes; c—red secondary calcite with white secondary calcite, FG7-2 971.8 m-Ma5 2 demystified microcrystalline dolomite; d—gypsum-mold hole filled calcite cathodoluminescence, FG4-3 076.8 m; e—fracture-cavity filled calcite cathodoluminescence, FG7-2 971.8 m; f—secondary chert cathodoluminescence, 2 867.08 m

暗淡边缘明亮的特征,细粒结构,解理不明显(图 2c);白色次生方解石呈中粒嵌晶状结构,解理发育,阴极发光多呈橘红色和昏暗-中等明亮红色光。

3.2 地球化学特征

3.2.1 微量元素

微量元素测试主要包含 Na、Fe、Sr、Mn 这 4 种元

素(表 1),结果显示次生方解石中 Fe 含量较高,为 $17.43\times 10^{-6}\sim 13\,867.36\times 10^{-6}$,Na 含量较低,为 $1.73\times 10^{-6}\sim 200.06\times 10^{-6}$;红色次生方解石 Sr 含量小,平均为 57.04×10^{-6} ,Fe 含量较高,平均值为 $4\,664.96\times 10^{-6}$,Mn 含量较低,平均值为 362.01×10^{-6} ;白色次生方解石 Sr 含量相对高,平均为 216.37×10^{-6} ,Fe 与

表 1 鄂尔多斯盆地富县地区马五段样品微量元素($w_B/10^{-6}$)以及碳氧同位素(‰)测试部分结果

Table 1 Concentration of trace elements($w_B/10^{-6}$) and values of carbon and oxygen isotope(‰) of samples from the fifth member of Majiagou Formation in Fuxian area of the Ordos Basin

分类	样品编号	深度/m	层位	Na	Mn	Fe	Sr	$\delta^{13}C_{PDB}$	$\delta^{18}O_{PDB}$	$^{87}Sr/^{86}Sr$
次生方解石	XF5-2	2 862.00	马六	34.56	630.73	7 626.98	47.43	-10.92	-4.09	0.709 3
	Y5-1	2 305.04	马五 1	121.54	293.14	2 622.73	33.90	-6.05	-6.71	0.710 0
	Y11-1	2 222.04	马五 1	156.56	211.24	10 220.45	63.05	-5.59	-6.07	0.709 0
	Y12-1	1 997.00	马五 1	48.38	661.60	3 004.53	65.37	-6.43	-8.22	-
	Y21-3	1 882.59	马五 1	200.06	195.95	2 668.43	92.17	-6.42	-7.57	-
	Y38-2	1 979.20	马五 1	45.03	33.98	1 824.34	56.92	-6.60	-4.70	-
	Y13-1	1 355.20	马五 1	121.06	205.04	5 875.47	50.35	-5.51	-7.08	0.710 0
	Y13-2	1 358.70	马五 1	102.95	631.35	6 056.49	59.46	-5.62	-6.73	0.710 0
	Y13-1	1 367.60	马五 1	118.76	671.79	4 667.84	47.74	-3.37	-6.90	0.710 0
	Y13-1	1 370.30	马五 1	84.15	289.87	3 002.26	60.57	-4.96	-7.65	-
	Y13-1	1 383.62	马五 2	62.81	157.40	3 745.00	50.44	-2.76	-6.30	0.709 0
	白色次生方解石	N101-1	马六	10.25	717.18	17.43	240.99	-3.48	-5.23	0.709 2
		FG7-1	马五 2	1.73	207.56	1 370.78	345.53	-6.55	-6.75	0.708 8
		R203-1	马五	89.84	1 478.76	13 867.36	62.59	-13.06	-6.90	0.709 3
白色原生方解石	FG4-1	3 076.80	马五 2	60.83	187.29	2 346.79	18.97	-5.42	-2.30	0.709 1
	N3-2	2 968.80	马五 1	4.45	160.68	812.85	13.38	-8.01	-1.39	0.708 7
	FG6-2	2 774.23	马五 4	7.92	170.20	2 733.86	362.08	-8.29	-7.36	0.709 8
	FG4-1	3 060.98	马五 1	5.37	468.49	133.84	193.46	-9.36	-9.44	0.709 3
	R1-1	2 986.18	马五 2	145.95	346.74	9 608.39	53.64	-8.80	-2.33	0.710 5
	R5-3	3 147.24	马五 14	18.15	211.80	1 596.36	54.39	-4.31	-2.28	0.709 5
	溶缝方解石	R203-1	马五 7	7.67	29.08	261.12	104.88	-6.94	-1.30	0.709 7
		R5-4	马五 14	5.94	644.92	2 797.67	564.61	-5.56	-2.56	0.709 3

-表示未达检测限。

Mn 含量较高,平均值分别为 $5\,085.19\times 10^{-6}$ 、 801.16×10^{-6} ;对于溶孔方解石和溶缝方解石,Na 含量较低,平均值分别为 40.45×10^{-6} 和 6.80×10^{-6} ,Sr 含量接近次生方解石,高于红色次生方解石,低于白色次生方解石,平均值分别为 115.99×10^{-6} 和 334.75×10^{-6} 。

3.2.2 稀土元素

稀土元素测试采用北美页岩为标准(Boynton, 1988)对原始数据进行标准化,再以标准化数据为基础进行分析(周国兴等, 2014)。稀土元素测试结果(表 2)显示,Eu 与 Ce 有不同程度的亏损, δEu 总体变化范围为 0.79~1.74,平均值 1.01,总体呈现正异常; δCe 总体变化范围为 0.47~1.29,平均值 0.97,总体表现为 Ce 负异常。对于不同岩性来说,溶孔方

解石 δEu 变化范围为 0.89~1.74,平均值为 1.22;溶缝方解石 δEu 变化范围为 0.81~0.92,平均值为 0.87;红色次生方解石 δEu 变化范围为 0.83~1.05,平均值为 0.95;白色次生方解石 δEu 变化范围为 0.79~0.89,平均值为 0.86。溶孔方解石 δCe 变化范围为 0.89~1.01,平均值为 0.95;溶缝方解石 δCe 变化范围为 1.04~1.06,平均值为 1.05;红色次生方解石 δCe 变化范围为 0.47~1.15,平均值为 0.97;白色次生方解石 δCe 变化范围为 0.84~1.07,平均值为 0.97(图 3a)。

3.2.3 C、O 同位素

碳酸盐岩中的碳氧同位素值反映了岩石形成时的环境条件,如温度、盐度、水深等(曹红霞等, 2018)。

表 2 鄂尔多斯盆地富县地区马五段样品稀土元素测试结果

Table 2 Rare earth element results of samples from Mawu section in Fuxian area, Ordos Basin

 $w_B/10^{-6}$

分类	样品编号	深度/m	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	δCe	δEu
红色次生 方解石	XF5-2	2 862.00	0.21	0.24	0.21	0.26	0.24	0.22	0.30	0.28	0.21	0.23	0.18	0.16	0.16	0.18	0.34	1.14	0.83
	Y5-1	2 305.04	0.04	0.06	0.06	0.08	0.10	0.12	0.12	0.14	0.11	0.14	0.11	0.10	0.11	0.11	0.19	1.29	1.04
	Y11-1	2 222.04	0.78	0.61	0.64	0.66	0.49	0.42	0.43	0.41	0.23	0.24	0.18	0.15	0.16	0.14	0.29	0.86	0.90
	Y12-1	1 997.00	0.09	0.07	0.05	0.06	0.08	0.08	0.08	0.08	0.06	0.08	0.05	0.05	0.05	0.05	0.10	0.96	1.04
	Y21-3	1 882.59	0.06	0.07	0.06	0.07	0.08	0.07	0.08	0.08	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.06	1.15	0.88
	Y38-2	1 979.20	0.06	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.06	0.47	0.89
	Y13-1	1 355.20	0.13	0.12	0.19	0.27	0.37	0.38	0.40	0.42	0.30	0.36	0.27	0.27	0.28	0.27	0.46	0.80	0.99
	Y13-2	1 358.70	0.17	0.20	0.18	0.20	0.19	0.19	0.18	0.19	0.14	0.15	0.13	0.13	0.13	0.12	0.18	1.12	1.00
	Y13-1	1 367.60	0.14	0.12	0.10	0.11	0.11	0.11	0.13	0.12	0.08	0.09	0.07	0.07	0.06	0.06	0.13	0.94	0.90
	Y13-1	1 370.30	0.27	0.24	0.26	0.28	0.24	0.26	0.25	0.26	0.16	0.20	0.16	0.13	0.13	0.13	0.25	0.90	1.05
白色次生 方解石	Y13-1	1 383.62	0.10	0.10	0.10	0.11	0.12	0.11	0.12	0.12	0.08	0.09	0.07	0.07	0.06	0.06	0.11	1.04	0.97
	XF5-3	2 862.00	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.06	0.05	0.03	0.05	0.04	0.04	0.02	0.02	0.12	0.84	0.89
	N101-1	2 949.85	0.37	0.44	0.45	0.52	0.40	0.36	0.50	0.31	0.17	0.15	0.10	0.05	0.06	0.03	0.36	1.07	0.79
	FG7-1	2 971.80	0.18	0.19	0.20	0.24	0.21	0.22	0.29	0.29	0.23	0.26	0.20	0.13	0.13	0.17	0.40	0.97	0.88
	FG4-1	3 076.80	0.00	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.06	0.08	0.05	0.06	0.04	0.03	0.02	0.01	0.07	0.91	1.03
	N3-2	2 968.80	0.02	0.04	0.05	0.07	0.12	0.14	0.13	0.11	0.08	0.09	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.95	1.12
	FG6-2	2 774.23	0.01	0.02	0.03	0.05	0.06	0.11	0.07	0.07	0.05	0.06	0.05	0.03	0.04	0.05	0.07	0.95	1.74
	FG4-1	3 060.98	0.00	0.01	0.02	0.04	0.11	0.12	0.17	0.17	0.13	0.12	0.09	0.07	0.05	0.06	0.17	0.89	0.89
	R1-1	2 986.18	0.04	0.04	0.05	0.06	0.05	0.07	0.06	0.07	0.05	0.06	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	1.00	1.18
	R5-3	3 147.24	0.05	0.07	0.08	0.10	0.12	0.17	0.13	0.12	0.08	0.07	0.06	0.04	0.03	0.02	0.08	1.01	1.36
白色 原生 方解石	R203-1	2 891.50	0.05	0.06	0.06	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.07	1.06	0.92
	R5-4	3 147.24	0.20	0.21	0.21	0.23	0.18	0.15	0.19	0.16	0.09	0.09	0.05	0.04	0.03	0.04	0.15	1.04	0.81

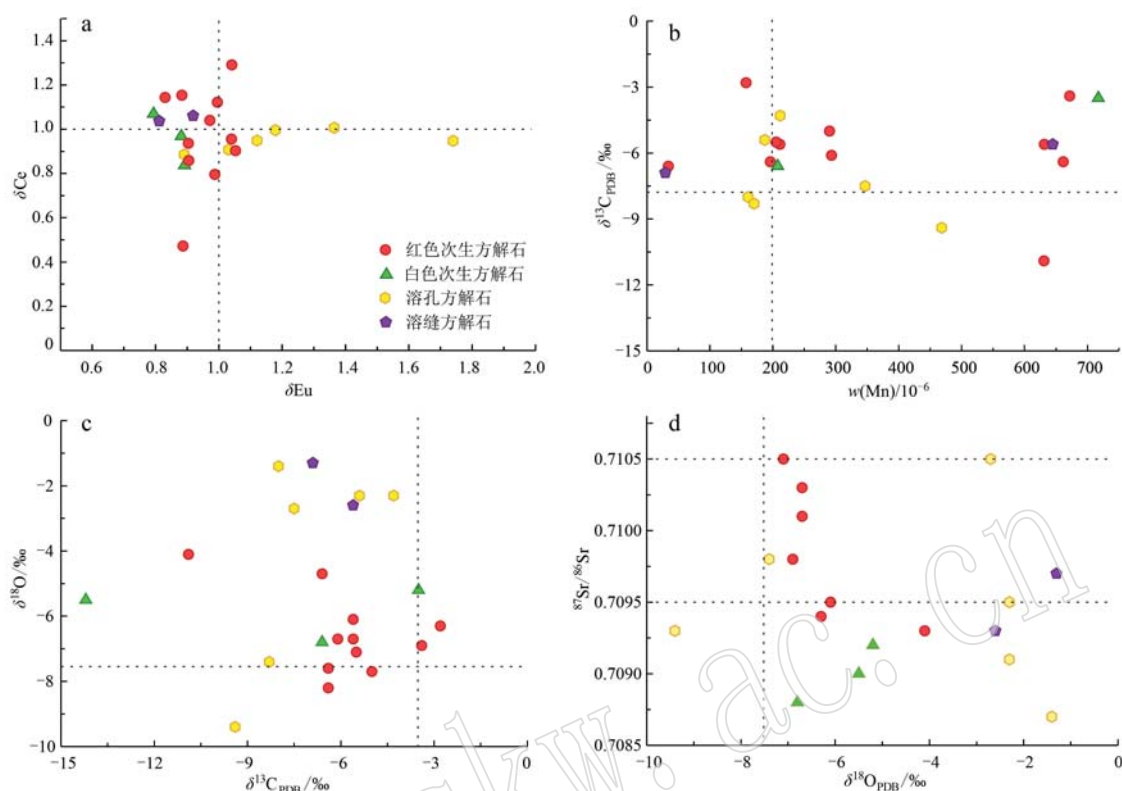


图3 方解石 $\delta\text{Ce}-\delta\text{Eu}$ (a)、 $\delta^{13}\text{C}-\text{Mn}$ (b)、 $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$ (c) 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-\delta^{18}\text{O}$ (d) 散点图

Fig. 3 $\delta\text{Ce}-\delta\text{Eu}$ (a), $\delta^{13}\text{C}-\text{Mn}$ (b), $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$ (c) and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-\delta^{18}\text{O}$ (d) scatter plots of calcite

实验数据(表1)显示,溶孔方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-9.44\text{‰} \sim -1.39\text{‰}$, 平均值为 -4.18‰ ; $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-9.36\text{‰} \sim -4.31\text{‰}$, 平均值为 -7.37‰ ; 溶缝方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-2.56\text{‰} \sim -1.30\text{‰}$, 平均值为 -1.93‰ ; $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-6.94\text{‰} \sim -5.56\text{‰}$, 平均值为 -6.63‰ ; 红色次生方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-8.22\text{‰} \sim -4.09\text{‰}$, 平均值为 -6.55‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-10.92\text{‰} \sim -2.76\text{‰}$, 平均值为 -5.84‰ ; 白色次生方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-6.90\text{‰} \sim -5.23\text{‰}$, 平均值为 -6.29‰ ; $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-13.06\text{‰} \sim -3.48\text{‰}$, 平均值为 -7.70‰ 。根据实验数据绘制出 $\delta^{13}\text{C}-\text{Mn}$ 元素散点图与 $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$ 散点图(图3b、3c)。

3.2.4 Sr 同位素

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为海水最重要的示踪元素之一,用于分析流体的来源与迁移路径(苏中堂等, 2012; 刘超飞等, 2017; 蒋苏扬等, 2019)。本次研究结果显示溶孔方解石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.7087 \sim 0.7105$, 平均值为 0.7095 ; 溶缝方解石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.7093 \sim 0.7097$, 平均值为 0.7095 ; 红色次生方解石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.7090 \sim 0.7100$, 平均值为 0.7096 ; 白色次生方解石值为 $0.7088 \sim 0.7093$, 平均值为 0.7091 , 绘制

的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-\delta^{18}\text{O}$ 散点图见图3d。

3.3 方解石 U-Pb 定年

本次实验采用方解石激光原位 U-Pb 定年方法, 实验结果如表3, 根据数据结果以及谐和图(图4)得出 FG4 样品的膏模孔充填方解石年龄为 333.3 ± 3.3 Ma, 为早石炭世中期; FG7 样品的溶缝充填方解石年龄为 332.8 ± 3.5 Ma, 为早石炭世中期; R201 样品的白色次生方解石年龄为 212.0 ± 19.0 Ma, 为晚三叠世。由于红色次生方解石的普通 Pb 含量过高而未测定出年龄, 但根据前面观察到的矿物学特征可以推断其形成时间早于白色次生方解石。

4 讨论

方解石的地球化学特征能够指示其形成环境和流体性质, 膏模孔、溶缝充填方解石 $\delta\text{Ce}-\delta\text{Eu}$ 值相对集中(图3a), 且在氧化还原界线附近, 指示其形成环境在地表与近地表的开放环境; Mn 元素含量较高、C 同位素较为稳定、O 同位素变化较大以及 Sr 同位素特征(图3b~3d)显示其流体为大气淡水。溶

表 3 方解石 U-Pb 测年结果
Table 3 Calcite U-Pb dating results

井名	深度/m	测试对象	点数	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	同位素年龄/Ma	$\pm 2\sigma$	误差率	加权平均方差
FG4	3 076.80	溶孔方解石	85	0.7~27.4	0.05~0.83	333.3	3.3	0.99%	4.4
FG7	2 971.80	溶缝方解石	87	0.01~26.6	0.05~0.83	332.8	3.5	1.05%	2.6
R201	2 867.08	白色次生方解石	27	0.7~4.6	0.74~0.85	212.0	19.0	8.96%	1.4

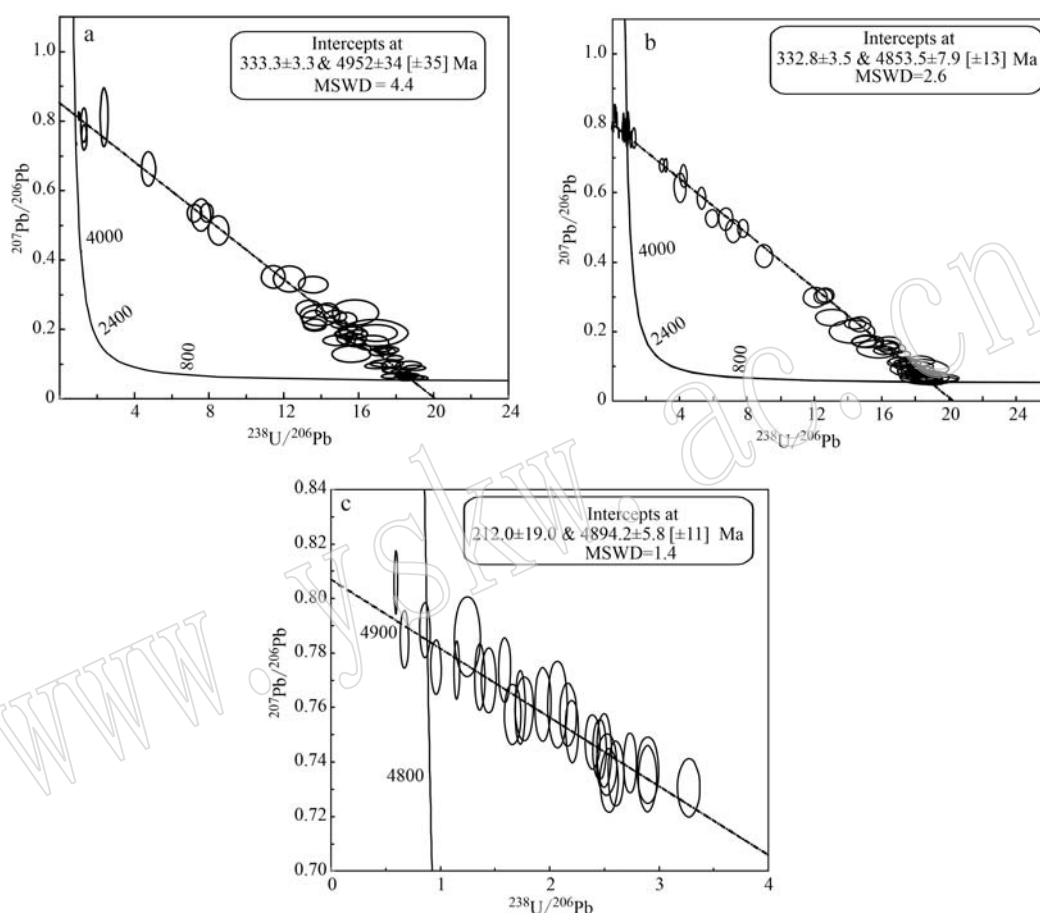


图 4 不同方解石 U-Pb 定年谐和图

Fig. 4 Concordat diagrams of different calcite U-Pb dating

a—FG4 井膏模孔充填方解石(3 076.8 m); b—FG7 井溶缝充填方解石(2 971.8 m); c—R201 井白色次生方解石(2 867.08 m)

a—calcite in paste mold hole from FG4 well (3 076.8 m); b—calcite in solution fracture from FG7 well (2 971.8 m);

c—white secondary calcite from R201 well (2 867.08 m)

孔、溶缝方解石 U-Pb 年龄分别为 333.3 ± 3.3 Ma 和 332.8 ± 3.5 Ma, 表明这类充填方解石形成时间为早石炭世中期。据此推测膏模孔、溶缝充填方解石在早石炭世中期, 大气降水与空气中 CO_2 反应形成 CO_3^{2-} , 富含 CO_3^{2-} 的大气淡水对近地表膏盐岩层中的石膏进行选择性的溶蚀, 并与溶蚀产生的 Ca^{2+} 反应, 沉淀于早表生期形成的膏模孔和缝隙中(马诚佑等, 2023)。

去白云石化作用在风化壳中普遍发育, 反应式

如下: $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2(\text{s}) + \text{Ca}^{2+} = 2 \text{CaCO}_3(\text{s}) + \text{Mg}^{2+}$, 主要形成红色次生方解石与白色次生方解石。红色次生方解石样品在 $\delta\text{Ce}-\delta\text{Eu}$ 图中相对集中地落在氧化还原界线附近, 指示其形成于地表与近地表的开放环境, 并且具有较高含量的 Mn(图 3b) 和负的 C 和 O 同位素(图 3c) 以及低 Sr 含量、高 Sr 同位素特征(图 3d), 表明其为大气淡水成因。早表生期, 风化壳遭溶蚀形成的孔隙裂缝系统为高 Ca/Mg 值的大气淡水淋滤提供良好途径, 使得流体中的 CO_3^{2-} 与石

膏溶蚀形成的 Ca^{2+} 反应进而形成方解石晶体,同时富铁白云石中释放出的 2 价铁会在晶体表面氧化形成 3 价铁的沉淀物或赤铁矿薄层,形成红色次生方解石(图 5b)(张杰等, 2012; 张军涛等, 2016; 方继瑶等, 2019; Fan *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2022)。由于此时 Ca^{2+} 有限,红色次生方解石仅对方解石进行等摩尔交代,从而多保留白云石晶型(Su *et al.*, 2021)。溶孔溶缝方解石以及红色次生方解石的形成环境均为地表和近地表较开放环境,且影响其成因的流体为大气淡水,而提供 Ca^{2+} 的石膏往往留在低地,因此这类方解石多形成于地貌相对较低的滞水带。

白色次生方解石 Ce 负异常(图 3a), O 同位素稳定而 C 同位素负偏(图 3c),指示其为还原环境下有机流体成因。晚石炭世,盆地沉降接受沉积,随着埋藏深度增加,温度压力条件变化,上覆煤系地层排烃,形成大量有机酸、 CO_2 和 H_2S ,为白色次生方解石的形成提供了条件。有机酸与沿裂缝上升的热流体混合后沿白云岩层孔缝扩散,进入下伏风化壳改造表生期溶缝,使得孔隙水进入,与 CO_2 和 H_2S 形成酸性流体,加速风化壳内红色次生灰岩和白云石溶蚀,

Ca^{2+} 的增加使得基岩白云岩去白云石化作用更彻底,再沉淀形成白色次生方解石(王建伟等, 2004; 张杰等, 2012; 张军涛等, 2016; 李婧娟, 2019; Su *et al.*, 2021)(图 5a); 同时白色次生方解石 U-Pb 年龄为 212.0 ± 19.0 Ma, 主要形成于晚三叠世(图 6), 为埋藏环境下的有机质成因。

鄂尔多斯盆地马家沟组风化壳储层的主要储集空间——膏模孔以及裂缝会被溶孔溶缝方解石充填占据,去白云石化作用则会将白云石转变为方解石,形成红色和白色两种次生方解石,使晶体体积增大,破坏风化壳储层的晶间孔(李婧娟, 2019),因此风化壳内各类方解石的形成均会破坏储层空间,降低储层质量。我们认为该地区风化壳的形成具有阶段性,早成岩期大气淡水溶蚀形成膏模孔,表生期进一步溶蚀形成缝洞系统,晚成岩期虽然存在有机酸溶蚀,但同时次生方解石形成,实质上是不利于储层发育的,应重视晚成岩期改造的研究,而风化壳的有效储集空间存在于方解石不发育或者发育较少的部位,因此在储层勘探过程中要避开充填方解石和次生方解石发育良好的部位,即古地貌相对低洼的滞水地带,关注古岩溶地貌高的部位。

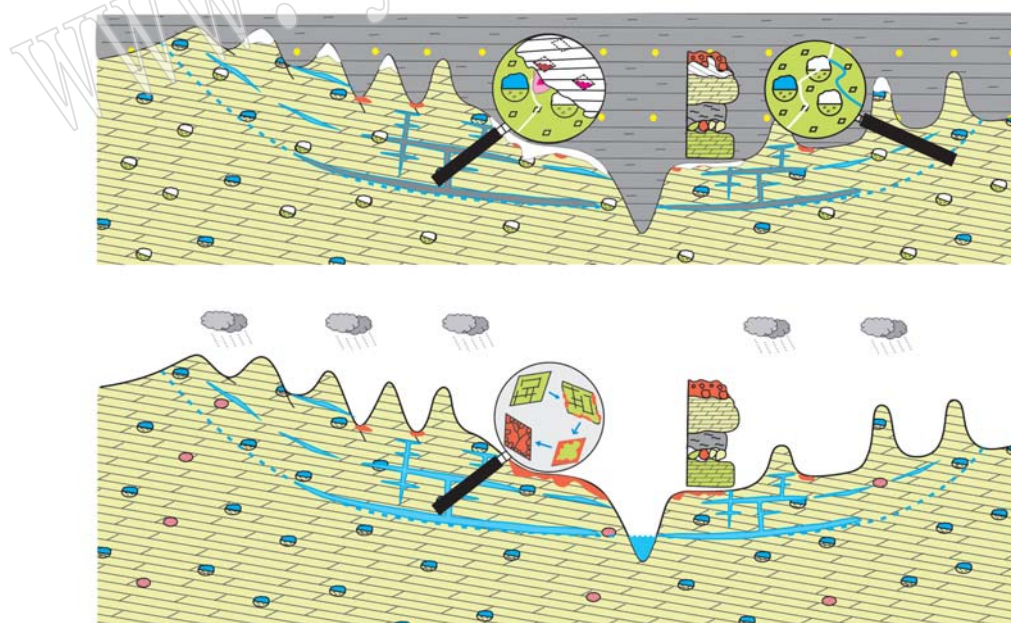


图 5 去白云石化作用机理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of dolomitization mechanism

a—白色次生方解石形成机理示意图; b—红色次生方解石形成机理示意图

a—schematic diagram of white secondary calcite formation; b—schematic diagram of red secondary calcite formation

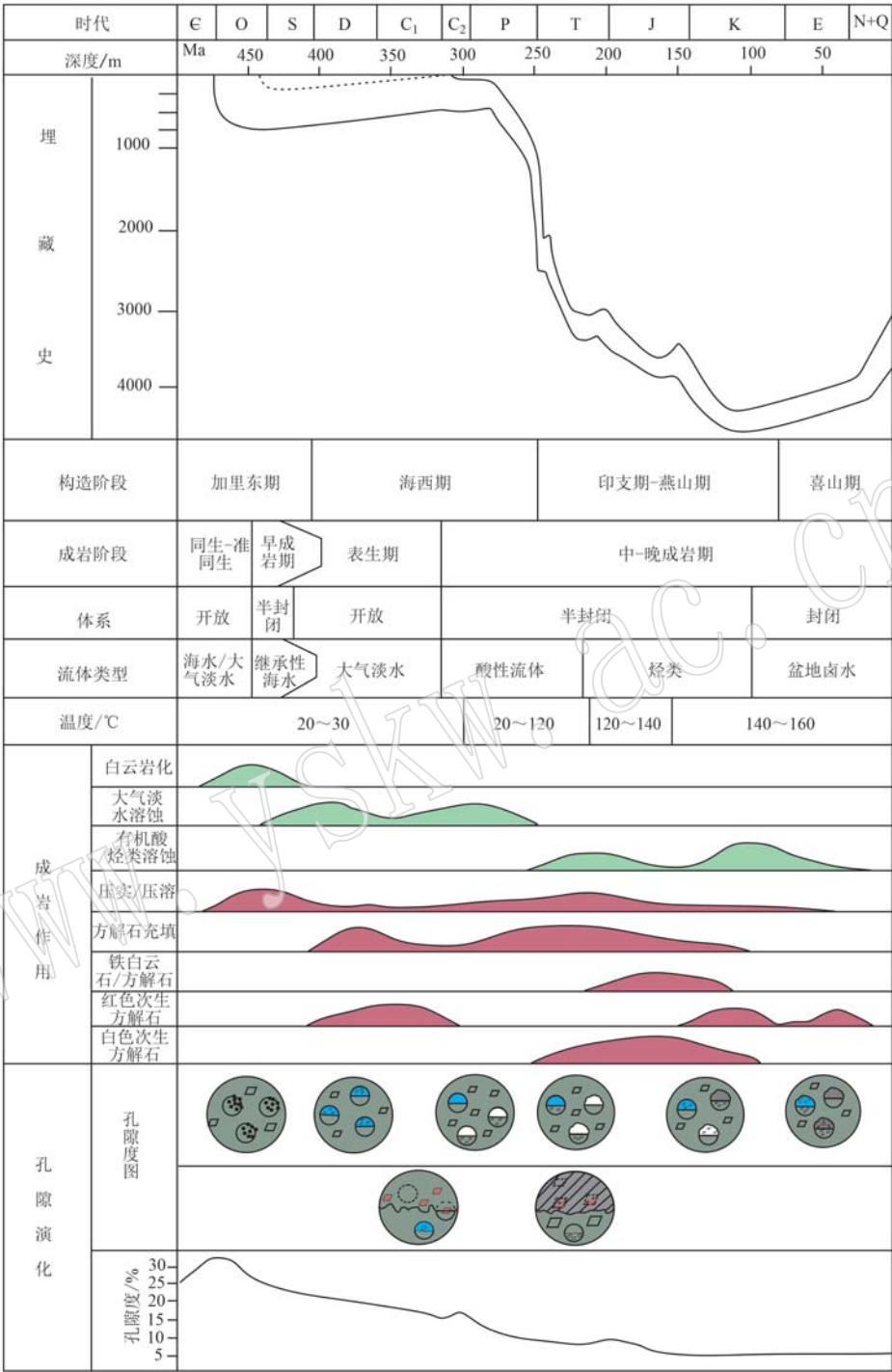


图 6 鄂尔多斯盆地富县地区埋藏史-成岩作用演化图

Fig. 6 Burial history-evolution of diagenesis in Fuxian area of the Ordos Basin

5 结论

(1) 膏模孔充填方解和溶缝充填方解石呈白色,解理发育,主要为大气淡水成因,其中膏模孔充

填方解石 U-Pb 年龄为 333.3 ± 3.3 Ma,溶缝充填方解石 U-Pb 年龄为 332.8 ± 3.5 Ma。

(2) 红色次生方解石解理发育不明显,等摩尔交代白云石晶体,为大气淡水成因,未获得年龄数据,推测形成于表生期;白色次生方解石呈中粒结

构,解理发育,U-Pb 年龄为 212.0 ± 19.0 Ma,主要形成于晚三叠期,为排烃期烃类酸性流体沉淀而成。

(3) 鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳中方解石多期次充填会破坏风化壳的缝洞系统,次生方解石的形成会占据晶间孔,从而降低岩石的孔隙度,破坏储层质量,勘探过程中建议避开低洼滞水区,关注古岩溶地貌高部位。

References

- Bao Hongping, Wang Qianping, Yan Wei, *et al.* 2023. Sedimentary characteristics and gas accumulation potential of the Ordovician carbonate-evaporite paragenesis system in central and eastern Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 30(1): 30~44 (in Chinese with English abstract).
- Bao Hongping, Yang Fan, Bai Haifeng, *et al.* 2017. Sedimentology study on sub-member lithofacies paleogeography mapping and its petroleum exploration significance: Taking Ma5 member of lower Ordovician Majiagou formation in central-eastern Ordos basin for example[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(4): 1 094~1 106 (in Chinese with English abstract).
- Boynton W V. 1988. Refractory trace element abundances as indicators of solar system formation processes[J]. *Chemical Geology*, 70(1~2): 30.
- Cao Hongxia, Shang Ting, Wu Haiyan, *et al.* 2018. Characteristics of carbon and oxygen isotopes of carbonate rocks in Majiagou Formation and their implication, southeastern Ordos Basin [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 48(4): 578~586 (in Chinese with English abstract).
- Chen Ruiyin, Luo Xiaorong, Chen Zhankun, *et al.* 2006. Restoration of burial history of four periods in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 27(2): 43~47 (in Chinese with English abstract).
- Dong Yan, Wang Shaoyi, Bai Shuying, *et al.* 2017. Characteristics and controlling factors of Ordovician weathering crust reservoir in Yichuan-Huanglong area, Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 22(3): 37~46 (in Chinese with English abstract).
- Fairbridge R W. 1978. Dedolomitization[C]//Fairbridge R W and Bourgeois J. *The Encyclopedia of Sedimentary*. Stroudsburg, Pennsylvania, Dowden: Hutchinson and Ross Inc, 233~235.
- Fan Z Y, Mao Z Y, Liu X, *et al.* 2022. Microstructure of dolostones of different geological ages and dedolomitization reaction[J]. *Materials*, 15(12): 4 109.
- Fang Jiayao, Chen Hongde, Shi Yunhe, *et al.* 2019. Characteristics and forming mechanism of palaeokarst reservoir of Majiagou Formation in Yichuan-Huanglong area of Ordos Basin, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 41(1): 83~95 (in Chinese with English abstract).
- Feng Zengzhao and Bao Zhidong. 1999. Lithofacies paleogeography of Majiagou age of Ordovician in Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(1): 1~8 (in Chinese).
- Fu Jinhua, Wei Xinshan, Ren Junfeng, *et al.* 2006. Gas exploration and developing prospect in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 27(6): 1~4, 13 (in Chinese with English abstract).
- Guo Yanru, Zhao Zhenyu, Fu Jinhua, *et al.* 2012. Ordovician sequence lithofacies palaeogeography in Ordos basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 33(S2): 95~109 (in Chinese).
- He H Q, Guo X J, Zhao Z Y, *et al.* 2022. New understandings on gas accumulation and major exploration breakthroughs in subsalt Ma 4 Member of Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 49(3): 489~501.
- He Jiang, Fang Shaoxian, Hou Fanghao, *et al.* 2013. Vertical zonation of weathered crust ancient Karst and the reservoir evaluation and prediction—A case study of M55-M51 sub-members of Majiagou formation in gas fields, central Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 40(5): 534~542 (in Chinese with English abstract).
- He Zixin, Zheng Congbin, Wang Caili, *et al.* 2005. Cases of discovery and exploration of marine field in China (part 2): Jingbian gas field, Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 10(2): 37~44 (in Chinese with English abstract).
- Huang Daojun, Wen Caixia, Ji Haikun, *et al.* 2009. Characteristics and key controlling factors of Ordovician weathering Karst crust reservoir in the eastern part of Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 14(3): 10~18 (in Chinese with English abstract).
- Huang Zhengliang, Wu Chunying, Ma Zhanrong, *et al.* 2015. Sedimentary sequence of Ordovician Majiagou formation in central and eastern part of Ordos Basin and its control over reservoir development[J]. *China Petroleum Exploration*, 20(5): 20~29 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Suyang, Zhang Yongsheng, Huang Wenhui, *et al.* 2019. Geochemical characteristics of Ordovician strontium isotope in the Ordos basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(11): 2 889~2 903 (in Chinese with English abstract).
- Li Guorong, Si Junxia and Shi Fazhan. 1997. Spatial types and formation mechanism of reservoir and permeability of Ordovician Majiagou for-

- mation in Ordos basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 24(1): 17~23 (in Chinese).
- Li Jingjuan. 2019. Study on the Mechanism of Dolomite Removal in Ordovician Mawu Member in Yichuan-Huanglong Area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Li W, Deng M, Mo L W, *et al.* 2022. Alkali carbonate reaction (ACR): Investigations on mechanism of dedolomitization of dolomite in dolostones [J]. Construction and Building Materials, 351: 128942.
- Liu Baoxian, Wang Hongwei, Ma Zhanrong, *et al.* 2011. Secondary limestone action on Ma5 member Dolomites in Yichuan-Huanglong Region of southeastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 22(5): 789~795 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chaoifei and Zhang Zhiqiang. 2017. Strontium isotope research progress[J]. Science Mosaic, (7): 26~33(in Chinese).
- Liu Entao, Zhao Jianxin, Pan Songqi, *et al.* 2019. A new technology of basin fluid geochronology: In situ U-Pb dating of calcite[J]. Earth Science, 44(3): 698~712 (in Chinese with English abstract).
- Ma Chengyou, Kang Zhiqiang, Zhang Lihao, *et al.* 2023. Dissolution and precipitation of calcite in different water environments[J]. Carsologica Sinica, 42(1): 29~39, 51 (in Chinese with English abstract).
- Ma Chunsheng, Xu Huazheng, Zheng Junmao, *et al.* 2011. Types and formation conditions of Ordovician Karst weathering-crust reservoirs in Fuxian slope area, Ordos Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 16(2): 42~46 (in Chinese with English abstract).
- Ren Junfeng, Bao Hongping, Sun Liuyi, *et al.* 2012. Characteristics and mechanism of pore-space filling of Ordovician wethering crust Karst Reservoirs in Ordos Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 17(2): 63~69 (in Chinese with English abstract).
- Ren Junfeng, Huang Zhengliang, Wei Liubin, *et al.* 2019. Controls on enrichment and accumulation of Ordovician subsalt natural gas in the central and eastern Ordos basin[J]. China Mining Magazine, 28(10): 163~167 (in Chinese with English abstract).
- Ren Junfeng, Liu Xinshe, Yu Jian, *et al.* 2021. Characteristics of natural gas accumulation and exploration target of the Ordovician subsalt in the central and eastern Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 26(6): 125~140 (in Chinese with English abstract).
- Ren Junfeng, Yang Wenjing, Ding Xuefeng, *et al.* 2016. Discussion on characteristics and origin of Majiagou Formation dolomite reservoir in Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 43(3): 274~281 (in Chinese with English abstract).
- Ren Zhanli, Qi Kai, Li Jinbu, *et al.* 2021. Thermodynamic evolution and hydrocarbon accumulation in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 42(5): 1 030~1 042 (in Chinese with English abstract).
- Shen Yang, Wu Xingning, Wang Shaoyi, *et al.* 2018. Pore-filling characteristics of Ordovician Karst reservoirs in eastern Ordos Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 23(3): 21~31 (in Chinese with English abstract).
- Shi Ji'an, Shao Yi, Zhang Shuncun, *et al.* 2009. Lithofacies paleogeography and sedimentary environment in Ordovician Majiagou formation, eastern Ordos basin[J]. Natural Gas Geoscience, 20(3): 316~324 (in Chinese with English abstract).
- Shu Pengcheng, Feng Qianghan, Xu Shumei, *et al.* 2021. Model of weathering crust karstification in the Ordovician, western Ordos basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 39(6): 1 565~1 579 (in Chinese with English abstract).
- Su Zhongtang, Chen Hongde, Lin Liangbiao, *et al.* 2011. Characteristics and control factors of palaeokarst reservoir of the Majiagou formation of lower Ordovician in northern Jingbian gas field of Ordos basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 31(1): 89~96 (in Chinese with English abstract).
- Su Zhongtang, Chen Hongde, Xu Fenyan, *et al.* 2012. Geochemical characteristics of rare earth elements in dolomite of Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 42(S2): 53~61 (in Chinese).
- Su Z T, Luo Z F, Li J J, *et al.* 2021. Dedolomitization from the meteoric environment to the burial environment of Ordovician dolostones (China): Results from petrographic and geochemical analyses[J]. Carbonates and Evaporites, 37(1): 6.
- Wang H H, Li J H, Zhang H T, *et al.* 2016. The absolute paleoposition of the North China Block during the Middle Ordovician[J]. Science China Earth Sciences, 59(3): 573~582.
- Wang Jianmin. 2011. Karst Palaeogeomorphology and Reservoir Characteristics of Ordovician Weathered Crust in Eastern Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University (in Chinese with English abstract).
- Wang Jianmin, Wang Jiayuan, Sha Jianhuai, *et al.* 2014. Karst paleogeomorphology and comprehensive geological model of the Ordovician weathering crust in the eastern Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 44(2): 409~418 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jianwei, Bao Zhidong, Tian Haiqin, *et al.* 2004. The diagenetic environment of sandstone and porosity evolution of pre-foreland basin strata: A case study of Permian strata on the western Ordos foreland

- basin[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23(1): 37~42 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qicong, Zhang Yu, Yang Yihua, *et al.* 2018. Sequence stratigraphic and lithofacies distributions of Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 48(4): 568~577 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xuelian, Wang Changlu, Chen Zhenlin, *et al.* 2005. Study of Ordovician weathering crust Karst reservoirs in Ordos Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 12(3): 32~35, 108 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yunuo, Ren Junfeng, Yang Wenjing, *et al.* 2015. Gas accumulation characteristics and potential of Ordovician Majiagou Reservoirs in the center-east of Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 20(4): 29~37 (in Chinese with English abstract).
- Wu Baoxiang, He Jinxian, Zhang Xiaoli, *et al.* 2012. Analysis of burial evolution of stratum and oil-gas reservoirs formation in Ordos basin [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 36(6): 8~13, 48, 5~6 (in Chinese with English abstract).
- Wu Dongxu, Zhou Jingao, Ren Junfeng, *et al.* 2023. Reconstruction of depositional environment and source-reservoir configuration relationship of Ordovician Majiagou formation in Ordos Basin[J]. *Earth Science*, 48(2): 553~567 (in Chinese).
- Xie Bohang, Wu Shitou, Yang Yueheng, *et al.* 2023. LA-MC-ICP-MS calcite U-Pb dating technique[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(1): 236~248 (in Chinese with English abstract).
- Xu W L, Li J Z, Liu X S, *et al.* 2021. Accumulation conditions and exploration directions of Ordovician lower assemblage natural gas, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 48(3): 641~654.
- Yang Junjie, Xie Qingbang and Song Guochu. 1992. Paleo-geomorphic pool-formed modes and gas reservoir sequence in the weathered crust of Ordovician in Eerduosi Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 12(4): 10, 8~13 (in Chinese with English abstract).
- Yang Peng, Ren Zhanli, Zhao Jianxin, *et al.* 2021. Tectonic evolution analysis constrained jointly by in situ calcite U-Pb dating and apatite fission track for southwestern Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 42(5): 1 189~1 201 (in Chinese with English abstract).
- Yao Jingli, Bao Hongping, Ren Junfeng, *et al.* 2015. Exploration of Ordovician subsalt natural gas reservoirs in Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 20(3): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Yu Zhou, Ding Zhenchun, Wu Dongxu, *et al.* 2017. Sedimentary facies evolution model of Ordovician Majiagou formation, central-eastern Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 22(3): 12~22 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Caili, Liu Xinshe, Yang Yajuan, *et al.* 2021. Petroleum exploration history and enlightenment of Changqing oilfield in Ordos basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 42(3): 253~263 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jie, Shou Jianfeng, Wen Yingchu, *et al.* 2012. Mechanism of dedolomitization and its rebuilding to reservoir[J]. *Journal of Palaeogeography*, 14(1): 69~84 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Juntao, Jin Xiaohui, Gu Ning, *et al.* 2021. Differences and development patterns of Karst reservoirs in Majiagou Formation, northern Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 42(5): 1 159~1 168, 1 242 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Juntao, Jin Xiaohui, Li Shujun, *et al.* 2016. Types and origin of pore-fillings from the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 37(5): 684~690 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Guoxing, Zhao Enhao, Yue Mingxin, *et al.* 2014. Geological significance of rare earth elements in geochemical analysis[J]. *Geology and Resources*, 23(5): 495~499 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jingao, Yu Zhou, Wu Dongxu, *et al.* 2022. Restoration of formation processes of dolomite reservoirs based on laser U-Pb dating: A case study of Ordovician Majiagou formation, Ordos basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 49(2): 285~295 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 包洪平, 王前平, 闫伟, 等. 2023. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系碳酸盐岩膏盐岩体系沉积特征与天然气成藏潜力[J]. *地学前缘*, 30(1): 30~44.
- 包洪平, 杨帆, 白海峰, 等. 2017. 细分小层岩相古地理编图的沉积学研究及油气勘探意义——以鄂尔多斯地区中东部奥陶系马家沟组马五段为例[J]. *岩石学报*, 33(4): 1 094~1 106.
- 曹红霞, 尚婷, 吴海燕, 等. 2018. 鄂尔多斯盆地东南部马家沟组碳酸盐岩碳同位素特征及意义[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 48(4): 578~586.
- 陈瑞银, 罗晓容, 陈占坤, 等. 2006. 鄂尔多斯盆地埋藏演化史恢复[J]. *石油学报*, 27(2): 43~47.
- 董岩, 王少依, 柏淑英, 等. 2017. 鄂尔多斯盆地宜川—黄龙地区奥陶系风化壳储层特征及主控因素研究[J]. *海相油气地质*, 22

- (3): 37~46.
- 方继瑶, 陈洪德, 史云鹤, 等. 2019. 鄂尔多斯盆地宜川—黄龙地区马家沟组古岩溶储层特征及形成机理[J]. 地球科学与环境学报, 41(1): 83~95.
- 冯增昭, 鲍志东. 1999. 鄂尔多斯奥陶纪马家沟期岩相古地理[J]. 沉积学报, 17(1): 1~8.
- 付金华, 魏新善, 任军峰, 等. 2006. 鄂尔多斯盆地天然气勘探形势与发展前景[J]. 石油学报, 27(6): 1~4, 13.
- 郭彦如, 赵振宇, 付金华, 等. 2012. 鄂尔多斯盆地奥陶纪层序岩相古地理[J]. 石油学报, 33(S2): 95~109.
- 何 江, 方少仙, 侯方浩, 等. 2013. 风化壳古岩溶垂向分带与储集层评价预测——以鄂尔多斯盆地中部气田区马家沟组马五1—马五1亚段为例[J]. 石油勘探与开发, 40(5): 534~542.
- 何自新, 郑聪斌, 王彩丽, 黄道军. 2005. 中国海相油气田勘探实例之二 鄂尔多斯盆地靖边气田的发现与勘探[J]. 海相油气地质, 10(2): 37~44.
- 黄道军, 文彩霞, 季海锟, 等. 2009. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳储层特征及主控因素分析[J]. 海相油气地质, 14(3): 10~18.
- 黄正良, 武春英, 马占荣, 等. 2015. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组沉积层序及其对储层发育的控制作用[J]. 中国石油勘探, 20(5): 20~29.
- 蒋苏扬, 张永生, 黄文辉, 等. 2019. 鄂尔多斯盆地奥陶系锶同位素地球化学特征[J]. 地质学报, 93(11): 2 889~2 903.
- 李国蓉, 司俊霞, 石发展. 1997. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组储渗空间类型与形成机制[J]. 成都理工学院学报, 24(1): 17~23.
- 李婧娟. 2019. 宜川—黄龙地区奥陶系马五段去白云石化作用机理研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 刘宝宪, 王红伟, 马占荣, 等. 2011. 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, 22(5): 789~795.
- 刘超飞, 张志强. 2017. 锶同位素研究综述[J]. 科技广场, (7): 26~33.
- 刘恩涛, Zhao Jianxin, 潘松圻, 等. 2019. 盆地流体年代学研究新技术: 方解石激光原位 U-Pb 定年法[J]. 地球科学, 44(3): 698~712.
- 马诚佑, 康志强, 张立浩, 等. 2023. 方解石在不同水环境中的溶解与沉淀作用[J]. 中国岩溶, 42(1): 29~39, 51.
- 马春生, 许化政, 郑浚茂, 等. 2011. 鄂尔多斯盆地富县地区奥陶系岩溶风化壳储集层类型与形成条件[J]. 海相油气地质, 16(2): 42~46.
- 任军峰, 包洪平, 孙六一, 等. 2012. 鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳岩溶储层孔洞充填特征及机理[J]. 海相油气地质, 17(2): 63~69.
- 任军峰, 黄正良, 魏柳斌, 等. 2019. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下天然气富集规律与气藏主控因素[J]. 中国矿业, 28(10): 163~167.
- 任军峰, 刘新社, 喻 建, 等. 2021. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下天然气成藏特征及勘探方向[J]. 中国石油勘探, 26(6): 125~140.
- 任军峰, 杨文敬, 丁雪峰, 等. 2016. 鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩储层特征及成因机理[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 43(3): 274~281.
- 任战利, 祁 凯, 李进步, 等. 2021. 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, 42(5): 1 030~1 042.
- 沈 扬, 吴兴宁, 王少依, 等. 2018. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳岩溶储层孔隙充填特征[J]. 海相油气地质, 23(3): 21~31.
- 史基安, 邵 毅, 张顺存, 等. 2009. 鄂尔多斯盆地东部地区奥陶系马家沟组沉积环境与岩相古地理研究[J]. 天然气地球科学, 20(3): 316~324.
- 舒鹏程, 冯强汉, 许淑梅, 等. 2021. 鄂尔多斯盆地西部奥陶系风化壳岩溶作用模式[J]. 沉积学报, 39(6): 1 565~1 579.
- 苏中堂, 陈洪德, 林良彪, 等. 2011. 靖边气田北部下奥陶统马五4~1段古岩溶储层特征及其控制因素[J]. 矿物岩石, 31(1): 89~96.
- 苏中堂, 陈洪德, 徐粉燕, 等. 2012. 鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩稀土元素地球化学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(S2): 53~61.
- 王洪浩, 李江海, 张华添, 等. 2016. 华北陆块中奥陶世绝对位置探讨[J]. 中国科学: 地球科学, 46(1): 57~66.
- 王建民. 2011. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳岩溶地貌与储层特征[D]. 西安: 西北大学.
- 王建民, 王佳媛, 沙建怀, 等. 2014. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳岩溶地貌特征及综合地质模型[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 44(2): 409~418.
- 王建伟, 鲍志东, 田海芹, 等. 2004. 前前陆盆地层系砂岩成岩环境特征及其孔隙演化——以鄂尔多斯盆地西缘二叠系为例[J]. 岩石矿物学杂志, 23(1): 37~42.
- 王起琮, 张 宇, 杨奕华, 等. 2018. 鄂尔多斯盆地马家沟组层序地层与岩相分布[J]. 西北大学学报(自然科学版), 48(4): 568~577.
- 王雪莲, 王长陆, 陈振林, 等. 2005. 鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳岩溶储层研究[J]. 特种油气藏, 12(3): 32~35, 108.
- 王禹诺, 任军峰, 杨文敬, 等. 2015. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组天然气成藏特征及勘探潜力[J]. 海相油气地质, 20(4): 29~37.

- 吴保祥, 何金先, 张晓丽, 等. 2012. 鄂尔多斯盆地地层埋藏演化与油气成藏分析[J]. 东北石油大学学报, 36(6): 8~13, 48, 5~6.
- 吴东旭, 周进高, 任军峰, 等. 2023. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组沉积环境恢复与源储配置关系[J]. 地球科学, (2): 553~567.
- 谢博航, 吴石头, 杨岳衡, 等. 2023. LA-MC-ICP-MS 方解石 U-Pb 定年技术[J]. 岩石学报, 39(1): 236~248.
- 杨俊杰, 谢庆邦, 宋国初. 1992. 鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳古地貌成藏模式及气藏序列[J]. 天然气工业, 12(4): 10, 8~13.
- 杨鹏, 任战利, Zhao Jianxin, 等. 2021. 方解石原位 U-Pb 测年结合磷灰石裂变径迹方法约束鄂尔多斯盆地西南部构造演化[J]. 石油与天然气地质, 42(5): 1 189~1 201.
- 姚泾利, 包洪平, 任军峰, 等. 2015. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下天然气勘探[J]. 中国石油勘探, 20(3): 1~12.
- 于洲, 丁振纯, 吴东旭, 等. 2017. 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, 22(3): 12~22.
- 张才利, 刘新社, 杨亚娟, 等. 2021. 鄂尔多斯盆地长庆油田油气勘探历程与启示[J]. 新疆石油地质, 42(3): 253~263.
- 张杰, 寿建峰, 文应初, 等. 2012. 去白云石化作用机理及其对储集层的改造[J]. 古地理学报, 14(1): 69~84.
- 张军涛, 金晓辉, 谷宁, 等. 2021. 鄂尔多斯盆地北部地区马家沟组岩溶储层的差异性和发育模式[J]. 石油与天然气地质, 42(5): 1 159~1 168, 1 242.
- 张军涛, 金晓辉, 李淑筠, 等. 2016. 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, 37(5): 684~690.
- 周国兴, 赵恩好, 岳明新, 等. 2014. 稀土元素地球化学分析在地质学中的意义[J]. 地质与资源, 23(5): 495~499.
- 周进高, 于洲, 吴东旭, 等. 2022. 基于激光 U-Pb 定年技术的白云岩储集层形成过程恢复——以鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组为例[J]. 石油勘探与开发, 49(2): 285~295.