

doi: 10.12029/gc20200318

刘丽红,王春连,李丽霞,杜治利,唐跃,韩森. 2020. 鄂尔多斯盆地南部奥陶系马六段白云岩特征及形成机制研究[J]. 中国地质, 47(3):810–820.
Liu Lihong, Wang Chunlian, Li Lixia, Du Zhili, Tang Yue, Han Miao. 2020. The characteristics and formation mechanism of Ordovician dolomite in Member 6 of Majiagou Formation in South Ordos Basin [J]. Geology in China, 47(3):810–820(in Chinese with English abstract).

鄂尔多斯盆地南部奥陶系马六段白云岩特征及形成机制研究

刘丽红^{1,2},王春连³,李丽霞⁴,杜治利¹,唐跃¹,韩森¹

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心,北京 100083;2. 北京大学石油与天然气研究中心,地球与空间科学学院,北京 100871;
3. 中国地质科学院矿产资源研究所,国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京 100037;
4. 中海油研究总院,北京 100028)

摘要: 鄂尔多斯盆地马六段在盆地大部分地区被剥蚀,仅在盆地周缘地区分布,因此,有关该盆地马六段白云岩成因研究较少。本文通过对马六段白云岩岩石学特征、阴极发光特征、微量元素特征以及碳氧同位素地球化学特征进行分析,对鄂尔多斯盆地南部马六段白云岩特征及形成机制进行了研究。研究表明,盆地南部马六段白云岩主要由细一中晶白云岩组成,白云石具“雾心亮边”结构,阴极发光呈暗红色光。微量元素总体上具有较低的 Fe、Mn 值,平均值分别为 447×10^{-6} 和 62×10^{-6} ,较高的 K、Na 值,平均值分别为 517×10^{-6} 和 252×10^{-6} ,以及中等含量的 Sr 元素值,平均值为 155×10^{-6} 。 $\delta^{13}\text{C}$ 值平均为 -0.617‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值平均为 -7.6‰ ,以上特征均反映出海源流体特征。白云石的“雾心”和“亮边”结构中微量元素含量相差不大,认为是在相同成岩环境的不同成岩阶段形成,其中“雾心”形成于浅埋藏环境的渗透回流白云石化作用,而“亮边”是在深埋藏环境下对早期白云石的调整和加强。

关键词: 马六段;白云岩特征;白云岩化机制;油气勘查工程;鄂尔多斯盆地南部

中图分类号:P588.24⁵ 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2020)03-0810-11

The characteristics and formation mechanism of Ordovician dolomite in Member 6 of Majiagou Formation in South Ordos Basin

LIU Lihong^{1,2}, WANG Chunlian³, LI Lixia⁴, DU Zhili¹, TANG Yue¹, HAN Miao¹

(1. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 2. Oil and Gas Research Center, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
4. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: Member 6 of Majiagou Formation in south Ordos basin has been eroded in most part of the south Ordos basin, and is

收稿日期:2017-11-09;改回日期:2018-05-18

基金项目:国家自然科学基金项目(41802173)和中国地质调查局地质调查项目(DD20160175, DD20190106, DD20190708, DD20190090)联合资助。

作者简介:刘丽红,女,1982年生,工程师,博士生,主要从事沉积学研究;E-mail:liulihong713@163.com。

通讯作者:王春连,男,1983年生,博士,副研究员,主要从事盆地沉积矿产研究;E-mail:wangchunlian312@163.com。

hence only distributed in the periphery of the basin. Therefore, less studies have been done on the origin of dolomite in member 6 of Majiagou Formation of the basin. Based on petrologic analysis, cathodoluminescence images, trace elements and carbon and oxygen isotope characteristics, the authors studied the characteristics and formation mechanism of dolomite in member 6 of Majiagou Formation in south Ordos basin. The results reveal that the dolomite of member 6 in south Ordos basin is mainly composed of fine-medium crystal dolomite with cloudy cores and clear rims as well as dark red luminescence. The dolomite has relatively low Fe and Mn content (average of 447×10^{-6} and 62×10^{-6}), relatively high K and Na content (average of 517×10^{-6} and 252×10^{-6}) and moderate content of Sr (average of 155×10^{-6}). Average value of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ is -0.617‰ and -7.6‰ respectively, moderate indicating its marine origin. The trace element content of cloudy cores is close to that of clear rims, which indicates that they were formed in similar diagenesis environments. The cloudy cores were formed in a shallow buried environment by seepage reflux dolomitization model, while the clear rims were recrystallized and adjusted in a deep buried environment.

Key words: 6th member of Majiagou Formation; characteristics of dolomite; dolomitization mechanism; oil and gas exploration engineering; south Ordos basin

About the first author: LIU Lihong, female, born in 1982, doctor, engineer, engages in research on sedimentology; E-mail: liulihong713@163.com

About the corresponding author: WANG Chunlian, male, born in 1983, doctor, associate researcher, engages in research on basin sedimentary mineral; E-mail: wangchunlian312@163.com.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41802173) and China Geological Survey Program (No.DD20160175; No.DD20190106; No. DD20190708; No.DD20190090).

1 引言

鄂尔多斯盆地地下奥陶统马家沟组马六段在盆地南缘广泛分布,从北向南厚度增大(阎荣辉等, 2009; 苏中堂等, 2012; 陈小炜等, 2014),受加里东构造运动影响,在盆地西南部“L”型古隆起以东仅7口井见到残厚4~17 m不等的马六段灰岩地层(周鼎武等, 2002),因此对该层段的白云岩成因研究较少。苏中堂等(2012)利用稀土元素地球化学特征证实盆地南部马家沟组白云岩化流体为海源流体,埋藏白云岩化成因。前人根据白云石晶体大小及其相应的地球化学特征将奥陶系马家沟组白云岩划分为准同生白云岩、渗透回流白云岩和埋藏白云岩(李凤杰等, 2016; 任军峰等, 2016; 包洪平等, 2017),均未对“雾心亮边”结构白云岩的成因进行详细探讨,且该研究主要集中于马五段及其以下地层。由于盆地南部马六段地层研究程度低,探讨白云岩的成因及分布规律,成为马六段天然气藏勘探的关键。笔者通过钻井岩心观察及镜下薄片鉴定,结合微量元素、碳氧同位素等分析测试,对鄂尔多斯盆地南部马六段白云岩成因机理进行系统研究,并建立了本区白云岩的形成模式,以期为该区油气勘探提供指导。

2 地质背景

本区奥陶系下统的划分可与鄂尔多斯中东部地层相对比(冯增昭等, 1998),按沉积旋回将马家沟群从下到上划分为6个组,即马一组、马二组、马三组、马四组、马五组和马六组。鄂尔多斯地区在奥陶系马家沟组六段时出现海侵,盆地广大地区为海水所覆盖(袁路朋等, 2014),水体较马五时期明显加深。受加里东运动的影响,盆内大部分地区多被风化剥蚀仅在鄂尔多斯周缘地区见到马六段的分布(何羽等, 2020)。从马六段沉积相分布图(图1)上可以看出,在盆地南缘平凉,庆城,韩城一带主要发育台缘斜坡-盆地,开阔台地,局限台地沉积(苏中堂等, 2013)。平凉以西发育有台缘斜坡-盆地相沉积,向东庆城,潼关一带大部分地区主要发育潮坪相沉积,其中以潮间-潮下灰云坪最为发育,沉积厚度最厚,局部地区可达500 m以上,主要分布于平凉以南陇县,岐山往潼关一带,另外也发育有潮上云坪,分布于黄深1井地区。从野外实测地质剖面来看,在白家滩地区,千阳大桥、岐山苜蓿河地区,崛山公园以及铁瓦殿地区发育有砂屑滩沉积,多为亮晶胶结,沉积能量较高,为储层发育的有利区域(杨俊杰等, 1992; 冯增昭等, 1998)。从钻井岩

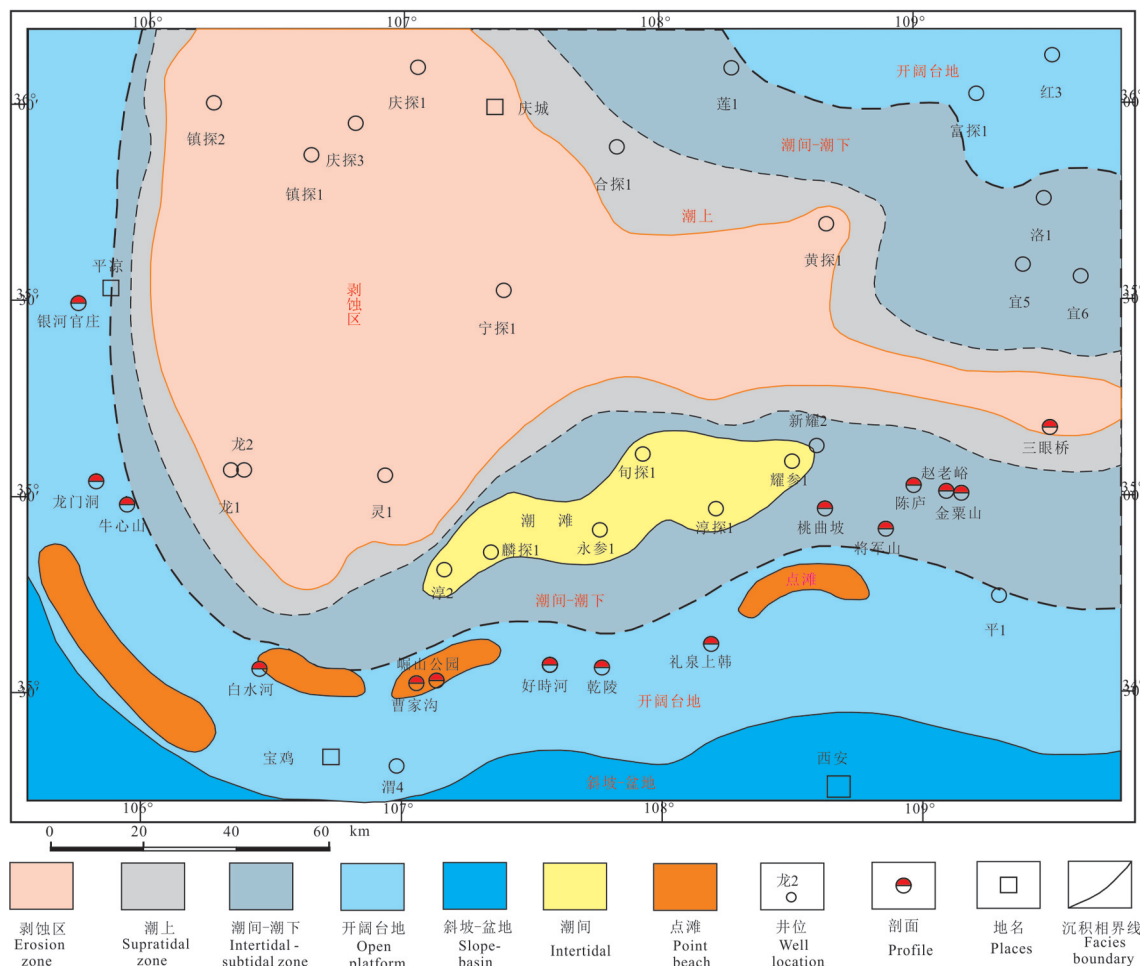


图1 鄂尔多斯盆地南部马六段沉积相分布图

Fig. 1 The sedimentary facies distribution map of 6th member of Majiagou Formation in the south Ordos basin

心资料上来看,在淳2井,永参1井,旬探1井,淳探1井一带也发育砂屑滩的沉积。上述地区马六段沉积经白云岩化作用形成了孔隙较好的晶粒白云岩,为本文研究的重点地区。

3 实验与方法

研究区位于鄂尔多斯盆地南部,本文所涉及马家沟组白云岩样品采自旬探1井、淳探1等钻井的新鲜岩心(图1),采样时注意样品的纯洁性,所有全岩样品都进行了铸体薄片和茜素红染色薄片的镜下鉴定,以确保样品分类分析的可靠性。样品用玛瑙研钵研磨并过200目筛后,用塑料样品袋包装,分别进行微量元素及碳氧同位素分析,每份样品重量保证大于等于10 g。

微量元素Fe、Sr等元素测试由中子活化分析法

(侯新生等,2001)(INAA)测量,测量仪器采用美国CANBER公司生产的Ge(Li)半导体探测器和4096道分析器;Mn元素采用X射线荧光法测量,测量仪器为Si-PIN半导体探测器,采用Pu-239激发源,检出限为0.01%。碳、氧同位素由中国石油集团西南油气田分公司勘探开发研究院地质实验室采用MAT252气体同位素质谱仪测试完成,实验温度20℃,湿度44%RH。

4 结果

4.1 岩石学特征

(1)晶粒结构白云岩。盆地南部马六段白云岩多为细晶结构,少数为中—细晶结构或粉—细晶结构,晶体表面污浊,多数隐约可见残余结构,晶体自形一半自形到他形,晶体多为非平直晶面他形结

构,反映形成温度可能高于50℃,岩石局部向孔隙内侧晶体边缘往往较中心干净,形成“雾心亮边”特征,在阴极发光照射下白云岩发暗红色光为主(图2a、b),反映白云岩化流体可能来源于海源流体(黄思静等,2008)。关于雾心亮边白云石的成因,目前有两种解释,一种认为白云石交代方解石组分时,初始阶段结晶速度快,泥质、灰质等杂质残留其中,形成雾心。随着孔隙流体盐度降低,白云石交代速度减慢,最后在污浊的白云石外形成无色透明的亮边。另一种观点认为,雾心亮边结构的白云岩是在早晚两个成岩阶段形成的:雾状核心是早期交代成因的白云石,明亮的环边是晚期孔隙水中化学沉淀的矿物晶体和自形加大边(吴仕强等,2008;伊海生等,2014)。

(2)残余结构白云岩。具残余结构的白云岩主

要为残余砂屑白云岩,白云石达细晶级,白云石晶体表面较污浊,晶体半自形,晶体之间非平直面接触,残余晶间孔周边白云石具亮边,白云石晶体间可见黑色有机质充填,这类白云岩发育少量晶间孔,面孔率1%~2%(图2c),可成为有效储层。另外一类具残余结构白云岩为残余藻纹层残余砂屑白云岩,白云石晶体细晶级,晶体半自形,晶体之间曲面-直面接触,残余砂屑间多为亮晶白云石胶结,可见颜色稍暗的残余藻纹层,该类岩石较少见晶间孔(图2d)。残余结构白云岩表明马六段沉积时应为相对高能的环境,该岩石系砂屑灰岩或藻纹层砂屑灰岩经白云岩化作用改造而成(白海峰等,2010)。

4.2 微量元素地球化学特征

对于典型“雾心亮边”结构特征白云石,为了确

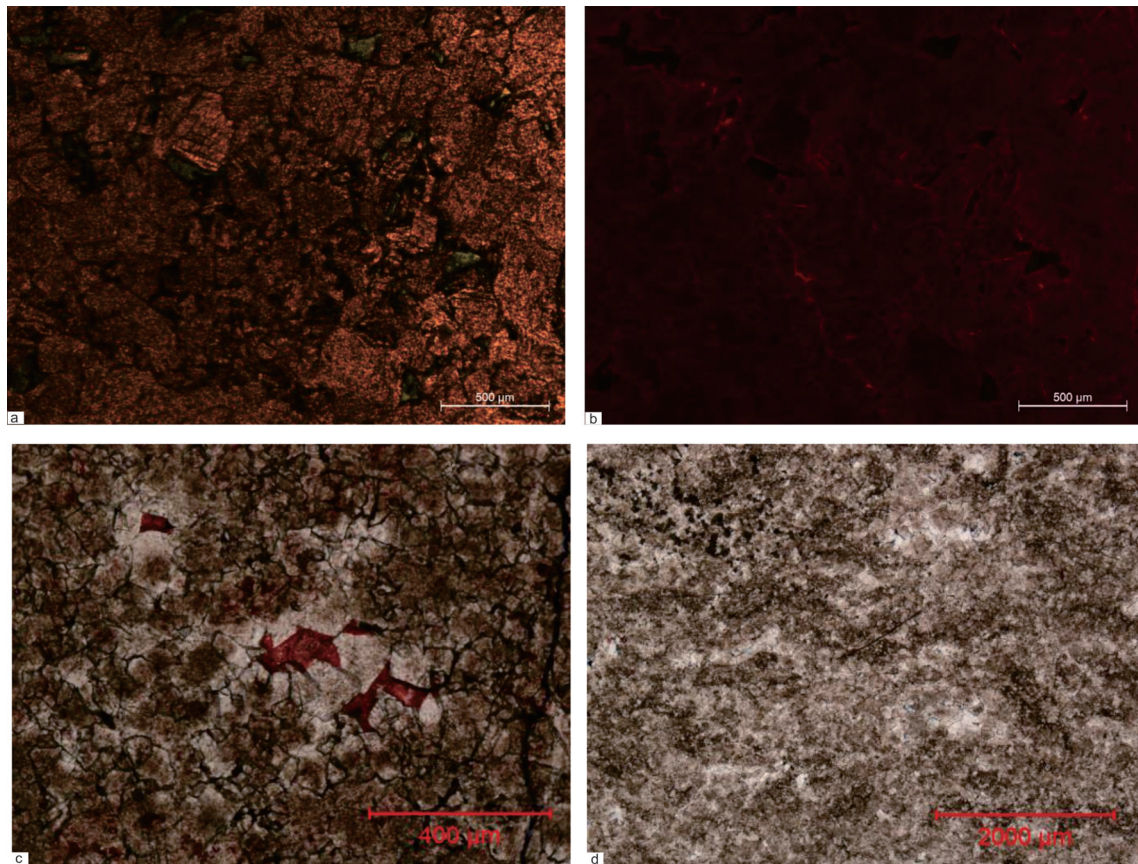


图2 鄂尔多斯盆地南部马六段白云岩储层岩石学特征

a—中—细晶白云岩,3301.62 m,马六,旬探1井,单偏光;b—图a的阴极发光CL;c—细晶残余砂屑云岩,粒间晶间孔被方解石充填,面孔率1%,2710 m,马六,淳探1,单偏光;d—细晶残余砂屑云岩,残余藻纹层构造,4274.28 m,马六,淳2,单偏光

Fig. 2 Petrologic characteristics of dolomite reservoir of member 6 in the south Ordos basin

a—Medium-fine crystal dolomite, 3301.62 m, member 6, Xuntan1 well (-); b—Cathodoluminescence image of Fig. 1; c—Fine residual arenaceous dolomite, pores in grains and crystals filled by cement with porosity of 1% (-), 2710 m, member 6, Chuntan1 well; d—Fine residual arenaceous dolomite, residual algae laminae texture (-), 4274.28 m, member 6, Chuntan2 well

定二者之间是否形成于同样的流体背景下,对其进行微区电子探针分析发现,从“雾心”到“亮边”(图3a,b),微量元素含量几乎相等(表1),具有相对高K、Na,低Fe、Mn的海源流体特征,反映出白云石在

形成过程中流体未发生变化,以海源流体为特征,是海源流体白云岩化的结果(刘丽红等,2010)。雾心亮边结构的白云岩是在早晚两个成岩阶段形成的:云雾状核心可能是在早期浅埋藏环境中,由富

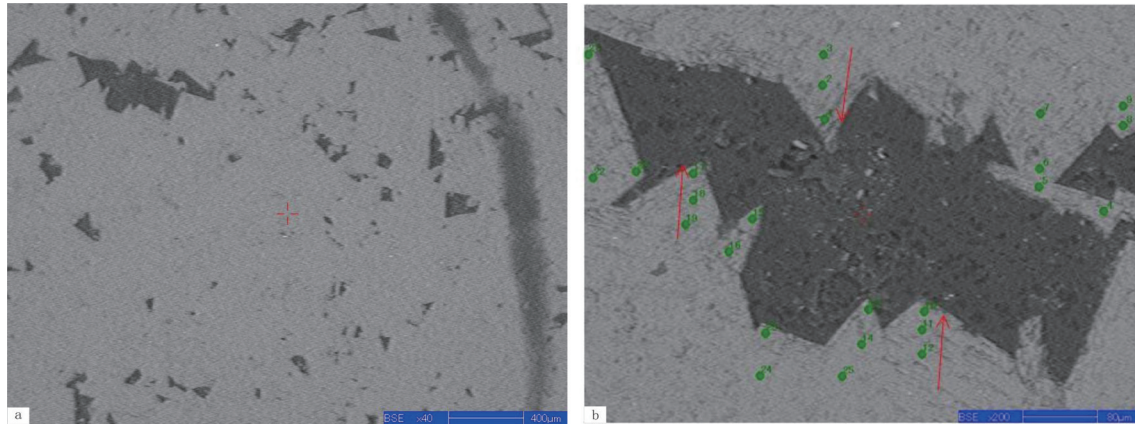


图3 中一细晶白云岩电子探针分析点位,3301.62 m,马六段,旬探1(a—单偏光;b—局部放大)

Fig. 3 Electron microprobe analysis points of medium-fine crystal dolomite, 3301.62 m, member 6, Xuntan1 well (a—single polarized light; b—Partial enlarged view)

表1 鄂尔多斯盆地南部旬探1井白云石电子探针分析数据(%)

Table 1 Electron microprobe analyses (%) of dolomite in Xuntan1 well in the south Ordos basin

数据	Na ₂ O	SrO	TiO ₂	MgO	BaO	FeO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	SO ₃	K ₂ O	CaO	总计
25	0.035	0	0.006	20.292	0.001	0.013	0.01	0.138	0.02	0.006	0.004	79.474	100
24	0.031	0.032	0	20.95	0.004	0.041	0.012	0.136	0	0.032	0.012	78.75	100
23	0.078	0.019	0.034	20.852	0	0.121	0.043	0.243	0.001	0.024	0.016	78.569	100
22	0.111	0.023	0.059	20.347	0.002	0.057	0.036	0.206	0	0.043	0.035	79.081	100
21	0.295	0.033	0.014	21.027	0	0.051	0.053	0.458	0.113	0.023	0.076	77.856	100
20	0.159	0.024	0.069	19.467	0.005	0.086	0.165	0.678	0.021	0.065	0.107	79.156	100
19	0.124	0	0.028	19.065	0	0.085	0.053	0.448	0.019	0.042	0.034	80.102	100
18	0.068	0.017	0	20.842	0.005	0.122	0.014	0.189	0.025	0.046	0.01	78.662	100
17	0.206	0.026	0.036	21.077	0	0.07	0.062	0.57	0.021	0.1	0.044	77.788	100
16	0.145	0	0.059	20.811	0.004	0.139	0.072	0.339	0	0.072	0.034	78.323	100
15	0.08	0.017	0	21.576	0	0.018	0.045	0.201	0.024	0.007	0.012	78.021	100
14	0.028	0.012	0	21.422	0.007	0	0.012	0.132	0	0.017	0.002	78.368	100
13	0.16	0.01	0.046	20.974	0.005	0.019	0.037	0.17	0.008	0.052	0.031	78.489	100
12	0.123	0.013	0.061	21.49	0	0.024	0.009	0.111	0	0.065	0.024	78.081	100
11	0.105	0	0.04	21.149	0	0.016	0.078	0.403	0	0.042	0.048	78.121	100
10	0.093	0	0.017	21.127	0	0.036	0.026	0.169	0	0.041	0.015	78.476	100
9	0.046	0.022	0	20.97	0	0.08	0.028	0.173	0.003	0.02	0.013	78.645	100
8	0.182	0.076	0.002	20.816	0.005	0.084	0.037	0.249	0.013	0.06	0.036	78.44	100
7	0.078	0.03	0.028	20.688	0.005	0.111	0.046	0.23	0	0.029	0.023	78.732	100
6	0.055	0	0	20.529	0.002	0.049	0.031	0.229	0.022	0.015	0.012	79.055	100
5	0.129	0.054	0.01	20.62	0	0.098	0.049	0.254	0.005	0.023	0.019	78.738	100
4	0.069	0.022	0.008	21.303	0.008	0.043	0.01	0.196	0.05	0.015	0.013	78.263	100
3	0.119	0	0.003	20.78	0	0.05	0.028	0.204	0.014	0.067	0.037	78.699	100
2	0.08	0	0.001	21.43	0	0.02	0.031	0.216	0.005	0.015	0.019	78.183	100
1	0.304	0	0.117	18.755	0	0.206	0.057	0.418	0.015	0.044	0.064	80.018	100

镁孔隙水交代周围灰质所形成,是早期交代成因的白云石,亮边则形成于深埋藏环境,明亮的环边是晚期孔隙水中化学沉淀的矿物晶体和自形加大边。

盆地南部马六段白云岩微量元素总体上具有低Fe、Mn,高K、Na特征(表2,图4),Sr含量高于一般白云岩值,各微量元素含量特征如下:Fe值分布在 $92 \times 10^{-6} \sim 794 \times 10^{-6}$,平均值 447×10^{-6} ;Mn含量为 $9 \times 10^{-6} \sim 152 \times 10^{-6}$,平均值 62×10^{-6} ;Sr含量在 $94 \times 10^{-6} \sim 262 \times 10^{-6}$,平均值 155×10^{-6} ;K值分布在 $257 \times 10^{-6} \sim 1189 \times 10^{-6}$,平均值 517×10^{-6} ;Na含量在 $119 \times 10^{-6} \sim 371 \times 10^{-6}$,平均值 252×10^{-6} 。微量元素这种特征表现出海源流体性质,中等Sr含量值反映出白云岩化过程中Sr元素的流失。

不同类型白云石的锶含量没有实质性的区别,大致变化在 $120 \times 10^{-6} \sim 150 \times 10^{-6}$ (黄思静等,2009),在碳酸盐矿物成分上,锶含量仅与岩石的白云石化程度有关,主要原因就是锶在白云石中的分配系数显著小于其在方解石中的分配系数(黄思静等,2007),因此方解石的白云石化过程就是Sr的丢失过程,本文中的白云岩的Sr含量平均值为 155×10^{-6} ,接近于川东北飞仙关组地层中的海相流体的Sr含量(126×10^{-6})(黄思静等,2009)。

根据前人(李凤杰等,2016)研究统计,正常海相灰岩中微量元素Sr含量 $73 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$,平均为 90×10^{-6} ,Na含量在 $220 \times 10^{-6} \sim 519 \times 10^{-6}$,平均为 370×10^{-6} ,准同生期白云岩中微量元素Sr含量 $67 \times 10^{-6} \sim 163 \times 10^{-6}$,平均为 97×10^{-6} ,Na含量在 $540 \times 10^{-6} \sim 1744 \times 10^{-6}$,平均为 1149×10^{-6} 。埋藏白云岩中Sr含量 $38 \times 10^{-6} \sim 111 \times 10^{-6}$,平均为 73×10^{-6} ,Na含量在 $250 \times$

表2 鄂尔多斯盆地南部白云石微量元素含量/ 10^{-6}
Table 2 Trace element data (10^{-6}) of dolomite in the south Ordos basin

样品编号	Fe	Mn	Sr	K	Na
C1-3	668	37	94	1189	272
C1-4	794	111	127	780	226
C1-1	300	17	154	332	239
C1-2	333	26	98	272	351
X1-1	701	128	147	259	371
X1-2	594	156	96	782	304
X1-3	92	9	260	257	119
X1-4	94	10	262	264	131
平均值	447	62	155	517	252

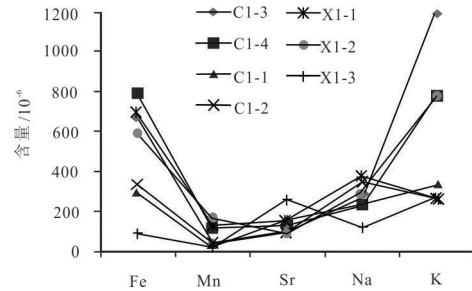


图4 鄂尔多斯盆地南部马六段白云岩微量元素含量分布图(图中代号见表2)

Fig.4 Trace element diagram of dolomite in member 6 of Majiagou Formation in the south Ordos basin

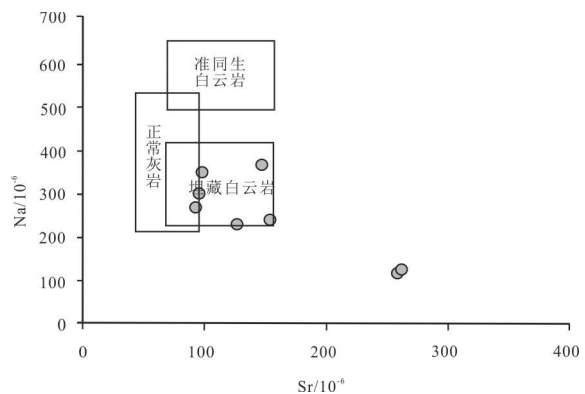


图5 鄂尔多斯盆地南部马六段白云岩Na-Sr含量图
Fig.5 Na-Sr content plot of dolomite in member 6 of Majiagou Formation in the south Ordos basin

$10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6}$,平均为 518×10^{-6} (图5)。从研究区内马六段白云岩Na-Sr含量交会图(图5)中可看出,这些白云岩样品基本上都落在埋藏白云岩分布区域,反映出白云岩化过程可能发生在埋藏条件下,是埋藏白云岩化作用的结果。从微量元素这些特征可以看出,盆地南部马六段白云岩具有海水或海源流体埋藏白云岩化特征,白云岩形成于埋藏条件下。

4.3 碳氧同位素地球化学特征

白云岩中 $\delta^{18}O$ 含量一般受水-白云石间平衡交换反应的影响,故温度和白云石形成溶液中 $\delta^{18}O$ 的含量是直接决定白云石 $\delta^{18}O$ 分布的因素。当补给缺乏或者强烈蒸发而导致海水盐度增高时,其沉积物中的 $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{13}C$ 值增高,相反亦然(Hird et al., 1987; Warren, 2000; 赵俊兴等,2005)。碳酸盐的氧同位素组成与流体氧同位素组成和沉淀时的温度

有关。流体氧同位素组成较轻(如大气降水)或者具有较高的温度,所形成的方解石通常会具有较轻的氧同位素组成(张学丰等, 2008; Liu Lihong et al., 2017a,b)。

前人研究(张永生, 2000; 黄思静等, 2007; 黄擎宇等, 2010; 李凤杰等, 2016; 包洪平等, 2017)结果统计, 准同生白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 多介于 -2.7‰ ~ -0.6‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 多介于 -7.4‰ ~ -10.3‰ , 埋藏白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 分布于 -1.0‰ ~ 2.5‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 分布于 -8.5‰ ~ -3.0‰ (图 6), 本文中白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在 -1.87‰ ~ 1.36‰ , 平均值 -0.62‰ , 同位素波动范围在奥陶系海水 -2‰ ~ 2‰ (Lohmann et al., 1988) 以内, 表明白云岩化流体可能为奥陶系同期海水; Shields et al., (2005) 等根据大量在成岩作用中变化最小的样品, 腕足碳酸盐岩分析结果, 中奥陶世碳酸盐岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 -9.0‰ ~ -5.4‰ , 平均为 -7.6‰ 。海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为千分之几, 取决于海水的盐度、温度及 pH 值等因素, 盐度高的海水有较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 大气淡水有较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(胡明毅等, 2011; 邵龙义等, 2002)。本文样品 $\delta^{18}\text{O}$ 范围在 -8.48‰ ~ -3.65‰ , 平均值 -5.84‰ (表 3, 图 6), 部分落在同期海水 $\delta^{18}\text{O}$ 范畴之内, 部分明显偏正, 说明高盐度孔隙水在蒸发浓缩过程中, 轻碳 ^{16}O 释放, 成岩流体更富 ^{18}O 所致。前人(张传禄等, 2001)对盆地南部马六段块状白云岩中白云石环边内包裹体进行测温, 显示包裹体均一温度分布在 $97\sim 109\text{℃}$, 最高温度可达 140℃ , 根据白云岩流体包裹体均一化温度和氧同位素组成投点图(图 7), 反映出白云岩化流体盐度显著高于现今海水, 更显著高于奥陶系海水, 说明白云岩环边主要是在深埋藏成岩过程中形成的。

表 3 鄂尔多斯盆地南部白云岩 C、O 同位素含量
Table 3 Carbon and oxygen isotope content of dolomite in the south Ordos basin

样品编号	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$
CT1-3	-1.87	-4.16
CT1-4	-0.83	-7.16
C2-1	-0.92	-3.90
C2-2	-0.77	-3.65
XT1-1	-0.52	-8.48
XT1-2	-0.77	-8.23
XT1-3	1.36	-5.30
平均值	-0.62	-5.84

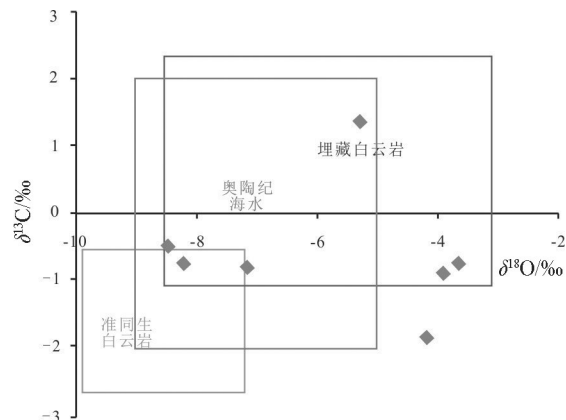


图 6 鄂尔多斯盆地南部马六段白云岩 C-O 同位素图
Fig. 6 Carbon and oxygen isotope plot of dolomite in member 6 of Majiagou Formation in the south Ordos basin

鄂尔多斯南部马六段白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 -0.617 , 而四川盆地中南部寒武系混合水白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -2.38 (刘丽红等, 2017), 美国康斯康星米夫林 (Mifflin) 段混合水白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -2.00 (Badiozamani, 1973), 可见本区马六段白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值比混合水白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值要高得多。显然, 其成因与混合水白云岩化相差较远, 而与 $\delta^{13}\text{C}$ 一般为正值的埋藏成岩环境相一致。岩石学及地球化学证据表明, 白云岩应为埋藏成因, 在浅埋藏时经渗透回流发生规模白云岩化, 深埋藏期间重结晶并过度生长形成较为干净的边缘。

5 讨论

前文根据马六段白云岩岩石学特征、地球化学特征结合盆地埋藏史显示, 马六段白云岩是形成于表生期之前浅埋藏阶段。马六段沉积后, 在中央古隆起区的障壁作用下, 东部盐洼沉积区主要处于强烈蒸发的局限海沉积环境, 由于石膏类矿物沉淀使沉积水体 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比显著提高, 成为高盐度的“富镁卤水”, “富镁卤水”由于密度较高而向西侧古隆起方向不断下渗, 使下伏沉积层中的孔隙流体盐度及 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比不断升高, 从而改变了下伏马六段沉积物的成岩介质环境, 使之具备了发生规模白云岩化的盐度及 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 等基本的地球化学条件。古隆起东侧的盐洼盆地在强烈蒸发沉淀、渐趋干化的过程中, 又在大的高潮及短期间歇性海侵的影响下, 不断受到古隆起西侧正常海水的回流补给, 从

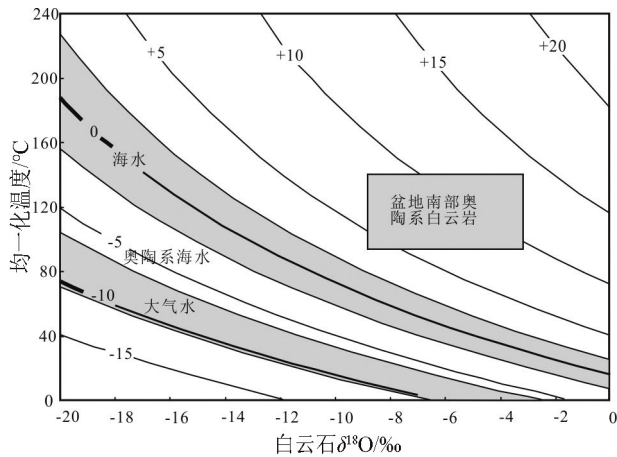


图7 鄂尔多斯盆地东南部奥陶系白云岩环边流体包裹体均一化温度和氧同位素组成投点图

等值线是与方解石平衡的水的氧同位素组成,根据张理刚(1985)的公式计算,海水的 $\delta^{18}O$ 值范围按现代海水值,大气水的 $\delta^{18}O$ 值范围的中间值按任建国(2000)西太平洋15个现代雨水的 $\delta^{18}O$ 平均值,奥陶系海水的 $\delta^{18}O$ 值据 Veizer 等(1999)

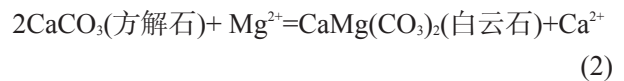
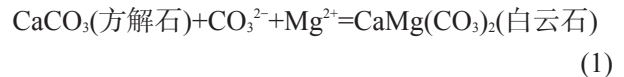
Fig.7 Fluid inclusion homogenization temperature with carbon and oxygen isotope composition plot for Ordovician carbonates in the southeast Ordos basin.

Isoline is the oxygen isotope of fluids (after Zhang et al.,1985). The $\delta^{18}O$ value of meteoric water is that of modern seawater (after Ren et al., 2000). The $\delta^{18}O$ value of Ordovician seawater is after Veizer et al. (1999).

而保证了膏岩矿物沉淀及下伏地层白云岩化作用能够不断地持续进行下去,尤其是大规模白云岩化作用所需的 Mg^{2+} 来源能长期稳定地足量供应(图8)。

在浅埋藏成岩阶段下(埋藏深度小于600 m),白云岩化流体主要是与蒸发环境有关的海水,成岩环境主要是海水潜流带,因而是近地表开放环境。该反应过程可能按照化学反应式(1)来进行(Lippman, 1973),由于该反应过程没有离子的带

出,因此没有岩石体积的缩小。由于这种白云石化作用主要是发生在浅埋藏成岩作用环境下,白云化流体交代方解石速度较快,形成云雾状核心。同时,早期的白云岩化作用形成白云岩相对灰岩更具抗压性,有利于早期形成晶间孔的保存,从而使白云岩化作用形成的晶间孔及后期溶蚀改造的溶孔、晶间溶孔得以保存。



在随后的中深埋藏成岩阶段(埋藏深度一般600~3000 m),成岩环境进入封闭成岩体系,成岩流体来源有限,主要为囚禁的海水,形成残余砂屑白云岩和粉-粗晶白云岩,是对早期白云岩的调整和加强。该反应过程可以按照化学反应式(2)来进行(Lippman, 1973),方解石和白云石的摩尔体积分别是 $36.93 \text{ cm}^3/\text{mol}$ 和 $64.34 \text{ cm}^3/\text{mol}$ (殷辉安, 1988),因此,方解石质颗粒转变成白云石时,体积缩小14.8%(黄思静等,2007)。白云岩化过程按照等摩尔交代灰岩,产生“体积收缩”效应,形成晶间孔,成为马六段白云岩储层最重要的孔隙体系。白云石的结晶速度相对较慢,所形成的白云石晶粒也相对较粗,且自形程度也明显偏高,从而形成明亮的环边。由于深埋藏成岩阶段与浅埋藏成岩阶段具有相同的成岩流体性质,因此白云石“雾心”和“亮边”具有相同的元素组成特征。

埋藏白云岩化作用形成了具有残余砂屑结构的细-中晶白云岩,厚度0~300 m,盆地南部主要保存在旬邑—永寿一带(图9),向北受古隆起影响逐渐歼灭,向南渭北隆起整体抬升,白云岩体遭受破

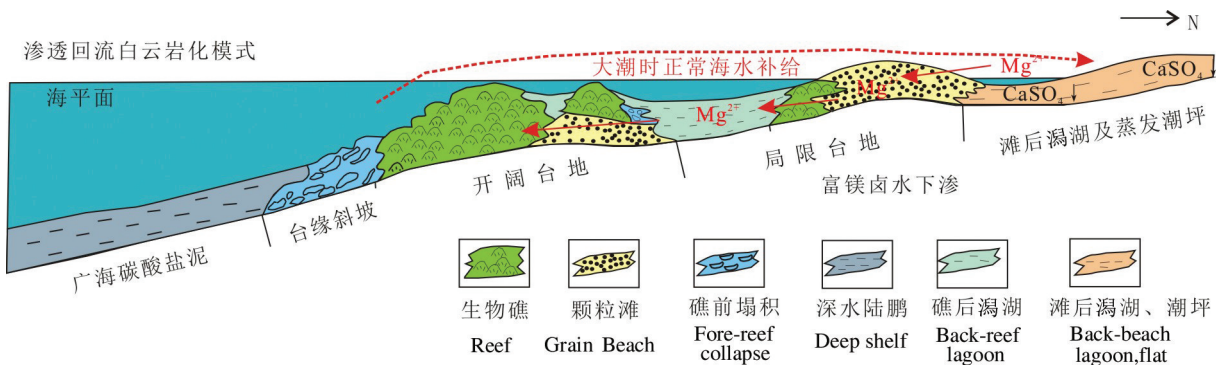


图8 鄂尔多斯盆地南部马六段白云岩化模式图

Fig.8 Dolomitization mode of member 6 of Majiagou Formation in the south Ordos basin

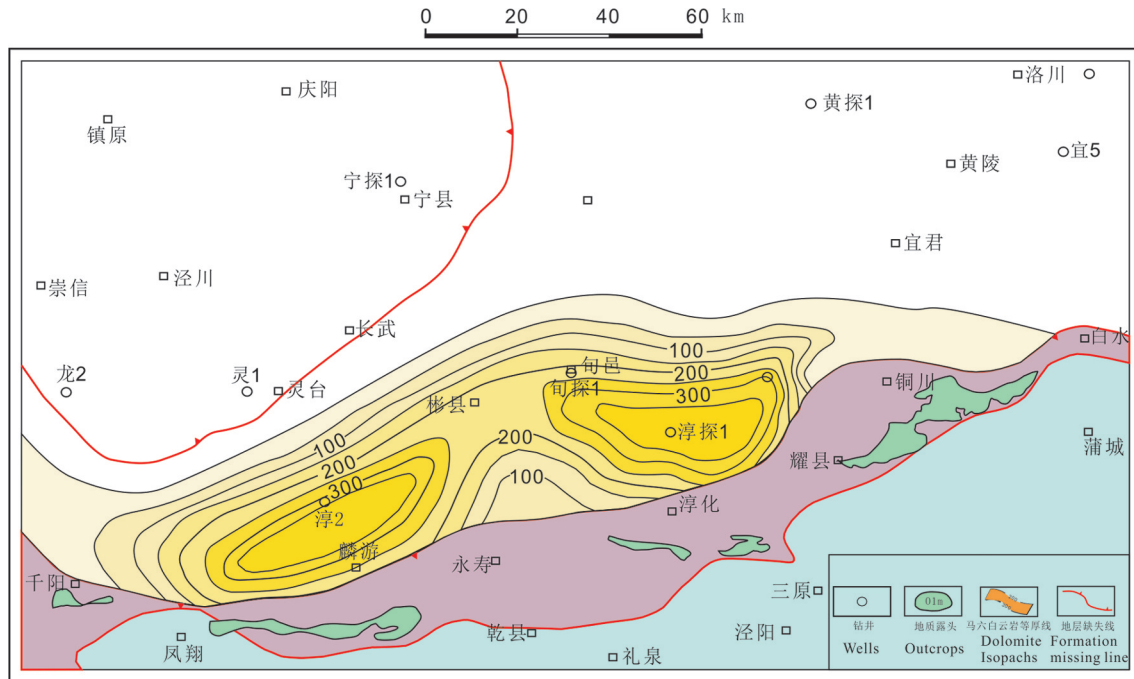


图9 鄂尔多斯盆地南部马六段白云岩厚度等值线图

Fig.9 Equal thickness map of dolomite in member 6 Majiagou Formation in the south Ordos basin

坏,因此马六段白云岩体在渭北隆起西段保存较好,可成为重点勘探区域。

6 结 论

(1)综合上述白云岩岩石学、地球化学特征表明,盆地南部马六段白云岩化流体为与蒸发环境有关的海水,白云岩的“雾心”部分形成于浅埋藏环境渗透回流作用。

(2)白云石“亮边”部分主要形成于深埋藏成岩阶段,成岩流体为地层中囚禁的海水,由于浅埋藏和深埋藏阶段具有相同的成岩流体性质,因此其“雾心”和“亮边”部分具有相近的元素组成。

(3)马六段白云岩体在渭北隆起西段保存较好,可成为重点勘探区域。

致谢:感谢中国地质调查局油气资源调查中心天山—兴蒙工程首席周新桂研究员,西部大型盆地碳酸盐岩项目负责人赵省民研究员对本文的指导;感谢两位审稿专家对本文提出的宝贵意见!

References

Badiozamani K. 1973. The dorag dolomitization model application to the middle Ordovician of Wisconsin[J]. *Sedimentary Petrology*, 43(4):965-984.

Bai Haifeng, Ma Zhanrong, Liu Baoxian. 2010. Reservoir-forming potential of Majiagou formation Ma-6 section in lower Ordovician in southern margin of Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 43(1): 107-114 (in Chinese with English abstract).

Bao Hongping, Yang Fan, Cai Zhengong, Wang Qianping, Wu Chunying. 2017. Origin and reservoir characteristics of Ordovician dolostones in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 37(1): 32-45 (in Chinese with English abstract).

Chen Xiaowei, Mou Chuanlong, Zhou Kenken, Kang Jiangwei, Wang Qiyu, Ge Xiangying, Liang Wei. 2014. Lithofacies-paleogeography of Middle-Late Ordovician Daping stage-Aijiashan stage on the western margin of the Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 41(6): 2028-2038 (in Chinese with English abstract).

Feng Zengzhao, Bao Zhidong, Zhang Yongsheng. 1998. *Stratigraphy Petrology Lithofacies*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-9 (in Chinese with English abstract).

He Yu, Ren Li, Deng Nan. 2020. The characteristics of the small faults in Mesozoic strata of ywb area in the south of Ordos Basin and its significance for oil and gas exploration[J]. *Northwestern Geology*, 53(1): 189-194(in Chinese with English abstract).

Hird K. 1987. The composition of carbonate and oxygen isotope in the ancient dolomite[J]. *AAPG Bulletin*, 34(4):156-232.

Hou Xinsheng, Ma Yingjie, Fang Fang, Qiao Yuande, Zhou Rongsheng. 2001. An application of NAA in analyzing the quality of coal[J]. *Nuclear Techniques*, 24(4): 264-268 (in Chinese with English abstract).

Huang Qingyu, Zhang Shaonan, Ding Xiaoqi, Duan Jie, Xiang Lei.

2010. Origin of dolomite of Ordovician Majiagou Formation, western and southern margin of the Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 32(2): 147–153 (in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Qing Hairuo, Hu Zuowei, Zou Mingliang, Feng Wenli, Wang Chunmei, Gao Xiaoyong, Wang Qingdong. 2007. Closed-system dolomitization and the significance for petroleum and economic geology: An example from Feixianguan carbonates, Triassic, NE Sichuan Basin of China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2955–2962 (in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Qing Hairuo, Hu Zuowei, Pei Changrong, Wang Qingdong, Wang Chunmei, Gao Xiaoyong. 2008. Cathodoluminescence and diagenesis of the carbonate rocks in Feixianguan Formation of Triassic, Eastern Sichuan Basin of China[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(1): 26–34 (in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Tong Hongpeng, Liu Lihong, Hu Zuowei, Zhang Xuehua, Huan Jinlai, Huang Keke. 2009. Petrography, geochemistry and dolomitization mechanisms of Feixianguan dolomites in Triassic, NE Sichuan, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2363–2372 (in Chinese with English abstract).
- Hu Mingyi, Hu Zhonggui, Li Sitian, Wang Yanqi. 2011. Geochemical characteristics and genetic mechanism of the Ordovician dolostone in the Tazhong area, Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(12): 2060–2069 (in Chinese with English abstract).
- Li Fengjie, Du Lingchun, Zhao Junxing, Li Yuegang, Xian Fang, Li Fuping. 2016. Dolomite genesis in Member Ma55 of Majiagou Formation, Sudong area, Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(3): 328–338 (in Chinese with English abstract).
- Lippman F. 1973. *Sedimentary carbonate minerals*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 150.
- Liu Lihong, Huang Sijing, Wang Chunlian, Huang Keke, Tong Hongpeng, Zhong Qianqian. 2010. Cathodoluminescence zonal texture of calcite cement in carbonate rock and its relationship with trace element composition: A case of Ordovician carbonate rock of Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 15(1): 55–60 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lihong, Du Xiaodi, Xu Shouli, Wen Huaguo. 2017a. Characteristics and formation of the Cambrian dolomite in Middle–South Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 47(3): 775–784 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lihong, Wang Chunlian, Wang Daming, Wang Haida. 2017b. A new example of retrograde solubility model for carbonate rocks[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 91(3): 1145–1146.
- Lohmann K C. 1988. Geochemical patterns of meteoric diagenetic systems and their application to studies of paleokarst[J]. *Paleokarst*. New York: Springer-Verlag, 58–80.
- Ren Jianguo, Huang Yipu, Fang Zhishan, Wang Xianbin. 2000. Oxygen and hydrogen isotope composition of meteoric water in the tropical West Pacific Ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 22(5): 60–64 (in Chinese with English abstract).
- Ren Junfeng, Yang Wenjing, Ding Xuefeng, Zhao Weibo, Huang Zhengliang, Wei Liubin. 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).
- Shao Longyi, He Hong, Peng Suping, Li Ruijun. 2002. Types and origin dolostones of the Cambrian and Ordovician of Bachu uplift area in Tarim Basin[J]. *Journal of Paleogeography*, 4(2): 19–30 (in Chinese with English abstract).
- Shields G A, Garden G A F, Veizer J, Meidla T, Rong J Y, Rong Y L. 2005. Sr, C and O isotope geochemistry of Ordovician brachiopods: A major isotope event around the Middle–Late Ordovician transition[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(11): 2005–2025, 2003.
- Su Zhongtang, Chen Hongde, Ouyang Zhengjian, Jin Xueqiang. 2012. Sequence-based lithofacies and paleogeography of Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 39(3): 623–633 (in Chinese with English abstract).
- Su Zhongtang, Chen Hongde, Xu Fenyang, Jin Xueqiang. 2013. Genesis and reservoir property of lower Ordovician Majiagou dolostones in Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 18(2): 15–22 (in Chinese with English abstract).
- Veizer J, Ala D, Azmy K, Bruckschen P, Buhl D. 1999. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater[J]. *Chem. Geol.*, 161:59–88.
- Warren J. 2000. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations[J]. *Earth–Science Review*, 52: 1–81.
- Wu Shiqiang, Zhu Jingquan, Wang Guoxue, Hu Wenxuan, Zhang Juntao, Wang Xiaolin. 2008. Types and origin of Cambrian–Ordovician dolomites in Tarim basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6):1390–1400 (in Chinese with English abstract).
- Yan Ronghui, Bai Haifeng, Liu Baoxian, Zhang Shuncun. 2009. Genesis and reservoir property of Lower Ordovician Majiagou dolostones in Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 20(5): 738–743.
- Yang Junjie, Li Keqin, Zhang Dongsheng. 1992. *Petroleum Geology of China: Vol. 20 Changqing Oil Field*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 64–71 (in Chinese with English abstract).
- Yin Hui'an. 1988. *Phase Equilibrium in Petrology*[M]. Beijing: Geologic Publishing House, 264–275 (in Chinese with English abstract).
- Yi Haisheng, Chen Zhiyong, Ji Changjun, Yang Xiaoping, Xia Guoqing, Wu Chihua. 2014. New evidence for deep burial origin of sucrosic dolomites from Middle Jurassic Buqu Formation in southern Qiangtang basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(3): 737–746 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Lupeng, Zhou Hongrui, Jing Xiuchun, Wang Zhentao, Chuan Tingting, Fang Qiang. 2014. Microfacies and facies analysis of the Ordovician carbonates in the south margin of the Ordos Basin[J].

- Acta Geologica Sinica, 88(3): 421–432 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chuanlu, Zhang Yongsheng, Kang Qifa, Luo Jian, Qi Lianshuang. 2001. Origin of Ordovician dolomite in Member Six of Majiagou Formation in South Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 22(3): 22–26 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ligang. 1985. The Application of the Stable Isotope to Geology[M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 267 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xuefeng, Hu Wenxuan, Zhang Juntao, Wang Xiaolin, Xie Xiaomin. 2008. Geochemical analyses on dolomitizing fluids of Lower Ordovician carbonate reservoir in Tarim basin[J]. Earth Science Frontiers, 15(2): 80–89 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongsheng. 2000. Mechanism of deep burial dolomitization of massive dolostones in the middle Majiagou group of the Ordovician, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 18(3): 424–430 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Junxing, Chen Hongde, Zhang Jinqian, Liu Xiaoli, Fu Suotang. 2005. Genesis of dolomite in the fifth member of Majiagou Formation in the middle Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 26(5): 42–45, 51 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Dingwu, Li Wenhong, Zhang Yunxiang. 2002. The Practice and Method of Regional Geology Comprehensive Study[M]. Beijing: Science Press, 305–309 (in Chinese with English abstract).
- 东北飞仙关组白云岩的主要类型、地球化学特征和白云化机制[J]. 岩石学报, 25(10): 2363–2372.
- 胡明毅, 胡忠贵, 李思田, 王延奇. 2011. 塔中地区奥陶系白云岩岩石地球化学特征及成因机理分析[J]. 地质学报, 85(12): 2060–2069.
- 李凤杰, 杜凌春, 赵俊兴, 李跃刚, 向芳, 李浮萍. 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[J]. 石油学报, 37(3): 328–338.
- 刘丽红, 黄思静, 王春连, 黄可可, 佟宏鹏, 钟倩倩. 2010. 碳酸盐岩中方解石胶结物的阴极发光环带与微量元素构成的关系——以塔河油田奥陶系碳酸盐岩为例[J]. 海相油气地质, 15(1): 55–60.
- 刘丽红, 杜小弟, 徐守礼, 文华国. 2017. 四川盆地中南部寒武系白云岩特征及形成机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 47(3): 775–784.
- 任建国, 黄奕普, 方志山, 王先彬. 2000. 热带西太平洋雨水的氢氧同位素组成[J]. 海洋学报, 22(5): 60–64.
- 任军峰, 杨文敬, 丁雪峰, 赵伟波, 黄正良, 魏柳斌. 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.
- 邵龙义, 何宏, 彭苏萍, 李瑞军. 2002. 塔里木盆地巴楚隆起寒武系及奥陶系白云岩类型及形成机理[J]. 古地理学报, 4(2): 19–30.
- 苏中堂, 陈洪德, 欧阳征健, 金学强. 2012. 鄂尔多斯地区马家沟组层序岩相古地理特征[J]. 中国地质, 39(3): 623–633.
- 苏中堂, 陈洪德, 徐粉燕, 金学强. 2013. 鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩成因及其储集性能[J]. 海相油气地质, 18(2): 15–22.
- 吴仕强, 朱井泉, 王国学, 胡文喧, 张军涛, 王小林. 2008. 塔里木盆地寒武—奥陶系白云岩结构构造类型及其形成机理[J]. 岩石学报, 24(6): 1390–1400.
- 阎荣辉, 白海峰, 刘宝宪, 张顺存. 2009. 鄂尔多斯盆地南缘下奥陶统马家沟组马六段成藏条件分析[J]. 天然气地球科学, 20(5): 738–743.
- 杨俊杰, 李克勤, 张东生. 1992. 中国石油地质志: 卷十二 长庆油田[M]. 北京: 石油工业出版社, 64–71.
- 殷辉安. 1988. 岩石学相平衡[M]. 北京: 地质出版社, 264–275.
- 伊海生, 陈志勇, 季长军, 杨晓萍, 夏国清, 吴池华. 2014. 羌塘盆地南部地区布曲组砂糖状白云岩埋藏成因的新证据[J]. 岩石学报, 30(3): 737–746.
- 袁路朋, 周洪瑞, 景秀春, 王振涛, 传婷婷, 房强. 2014. 鄂尔多斯盆地南缘奥陶系碳酸盐微相及其沉积环境分析[J]. 地质学报, 88(3): 421–432.
- 张传禄, 张永生, 康祺发, 罗健, 祁连爽. 2001. 鄂尔多斯南部奥陶系马家沟群马六组白云岩成因[J]. 石油学报, 22(3): 22–26.
- 张理刚. 1985. 稳定同位素在地质科学中的应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 267.
- 张学丰, 胡文瑄, 张军涛, 王小林, 谢小敏. 2008. 塔里木盆地奥陶统白云岩化流体来源的地球化学分析[J]. 地学前缘, 15(2): 80–89.
- 张永生. 2000. 鄂尔多斯地区奥陶系马家沟群中部块状白云岩的深埋白云石化机制[J]. 沉积学报, 18(3): 424–430.
- 赵俊兴, 陈洪德, 张锦泉, 刘小丽, 付锁堂. 2005. 鄂尔多斯盆地中部马五段白云岩成因机理研究[J]. 石油学报, 26(5): 42–45, 51.
- 周鼎武, 李文厚, 张云翔. 2002. 区域地质综合研究的方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 305–309.

附中文参考文献

- 白海峰, 马占荣, 刘宝宪. 2010. 鄂尔多斯盆地南缘下奥陶统马家沟组马六段成藏潜力分析[J]. 西北地质, 43(1): 107–114.
- 包洪平, 杨帆, 蔡郑红, 王前平, 武春英. 2017. 鄂尔多斯盆地奥陶系白云岩成因及白云岩储层发育特征[J]. 天然气工业, 37(1): 32–45.
- 陈小炜, 牟传龙, 周恩恩, 康建威, 王启宇, 葛祥英, 梁薇. 2014. 鄂尔多斯西缘中晚奥陶世大坪阶—艾家山阶岩相古地理[J]. 中国地质, 41(6): 2028–2038.
- 冯增昭, 鲍志东, 张永生. 1998. 鄂尔多斯奥陶纪地层岩石岩相古地理[M]. 北京: 地质出版社, 1–9.
- 何羽, 任丽, 邓楠. 2020. 鄂尔多斯盆地南部 ywb 地区中生界小断层特征及其油气勘探意义[J]. 西北地质, 53(1): 189–194.
- 侯新生, 马英杰, 方方, 邱元德, 周蓉生. 2001. 中子活化分析在煤质分析中的应用[J]. 核技术, 24(4): 264–268.
- 黄擎宇, 张哨楠, 丁晓琪, 段杰, 向雷. 2010. 鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系马家沟组白云岩成因研究[J]. 石油实验地质, 32(2): 147–153.
- 黄思静, QING HaiRuo, 胡作维, 邹明亮, 冯文立, 王春梅, 邵晓勇, 王庆东. 2007. 封闭系统中的白云石化作用及其石油地质学和矿床学意义——以四川盆地东北部三叠系飞仙关组碳酸盐岩为例[J]. 岩石学报, 23(11): 2955–2962.
- 黄思静, 卿海若, 胡作维, 裴昌蓉, 王庆东, 王春梅, 邵晓勇. 2008. 川东三叠系飞仙关组碳酸盐岩的阴极发光特征与成岩作用[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 33(1): 26–34.
- 黄思静, 佟宏鹏, 刘丽红, 胡作维, 张雪花, 郇金来, 黄可可. 2009. 川