

引用格式:田辰,胡广,徐政语,等.2026.川南茅一段白云石化过程及对眼球状灰岩形成的指示——以DB1井为例[J].沉积学报,44(1):37-53.

TIAN Chen, HU Guang, XU ZhengYu, et al. 2026. Dolomitic Process in the First Member of the Maokou Formation, Southern Sichuan Basin, and Its Indication for the Formation of the Eyeball-Shaped Limestone: A case of well DB1[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(1): 37-53.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.045

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.045

川南茅一段白云石化过程及对眼球状灰岩形成的指示——以DB1井为例

田辰^{1,2}, 胡广^{1,2}, 徐政语³, 庞谦^{1,2}, 刘人萍^{1,2}, 刘沛云^{1,2}, 刘屹东^{1,2}

1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500

2. 中国石油碳酸盐岩储层重点实验室沉积与成藏西南石油大学研究分室, 成都 610500

3. 中国石油杭州地质研究院, 杭州 310023

摘要 【目的】灰岩—泥灰岩韵律层作为气候、水文以及地质事件的载体,是地质学者的重点研究对象,但四川盆地茅一段眼球状灰岩的成因一直存在争议。DB1井茅一段眼球状灰岩中发育准同生—早成岩期白云石化现象,可以较好限制碳酸盐岩的沉积环境。【方法】通过对DB1井茅一段云质岩类系统的岩石学和地球化学分析,讨论云化流体和云化过程。【结果】DB1井茅一段存在三种云质岩类,眼皮状云质灰岩(I,泥质云岩)发育准同生期溶蚀孔,阴极发光环带发育,具有平坦型稀土配分模式,较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值以及低于海水的Y/Ho,是少量大气淡水混合海水在准同生期云化形成;眼皮状云质灰岩(II,灰质云岩)具有左倾型稀土配分模式,与同沉积海水一致的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和Y/Ho,为弱蒸发的海水在同沉积期—准同生阶段云化而成;眼球状云质灰岩(含云质灰岩)具有左倾型稀土配分模式,较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值,近似海水的Y/Ho,是孔隙水在早成岩阶段云化而成。【结论】茅一段准同生—早成岩期云化限制了其沉积时较浅的水体环境。此外以眼皮部分为主的层段具有更高的泥质含量和铈同位素值,以及更低的碳氧同位素和Y/Ho,表明以眼皮部分为主的层段沉积时的水体更浅。

关键词 四川盆地南部;茅口组一段;眼球状灰岩;沉积过程;白云石成因

第一作者 田辰,女,1999年9月生,硕士研究生,石油地质,E-mail: tianchen2018@foxmail.com

通信作者 胡广,男,教授,E-mail: 201499010113@swpu.edu.cn

中图分类号:P632 文献标志码:A 文章编号:1000-0550(2026)01-0037-17

0 引言

灰岩—泥灰岩韵律层是重要的天文轨道调谐研究载体,利用沉积韵律层可对天文轨道周期引起的环境周期变化进行重建,因此备受学术界关注(Shi *et al.*, 2021; 宋翠玉和吕大炜, 2022)。但灰岩—泥灰岩韵律层相比碎屑岩韵律层容易受到成岩作用的改造,灰岩—泥灰岩韵律结构到底是由沉积环境周期性变化控制(Pang *et al.*, 2021),还是受后期差异成岩作用影响形成目前仍有争议(Hallam, 1986; Gomes *et al.*, 2021)。灰岩—泥灰岩韵律层在自然界有多种表现形式,包括成层性良好的灰岩—泥灰岩韵律层以及成层性不好的韵律层。当眼球(灰岩)含量较少

时,眼球往往呈断续顺层排列,眼球层之间被眼皮层(泥灰岩)分隔。当眼球含量高时,被眼皮包绕的眼球跨层产出,导致成层性差,总体表现为块状结构(何明薇和罗进雄, 2016)。在成层性较差的韵律层中,眼球呈椭球体被眼皮包绕产出,常被称为眼球状灰岩(罗进雄等, 2019)。

四川盆地的茅口组一段发育一套典型的眼球状灰岩,其“眼球”颜色相对较浅,为灰色—深灰色,泥质含量较低,呈透镜状断续成层分布,这套眼球状灰岩同样被作为深时古环境重建的重要研究对象(Li *et al.*, 2018),并且目前在川南地区茅口组一段眼球状灰岩也突破了工业气流,是四川盆地二叠系重要的勘探层系(刘瑾等, 2019; 韩月卿等, 2022)。因此

收稿日期:2023-01-05;修回日期:2024-03-15;录用日期:2024-04-19;网络出版日期:2024-04-19

基金项目:中石油科技创新联盟体项目(2020CX010302)

对其开展详细的研究具有重要的科学意义和实践意义。前人针对茅口组这套韵律层的灰岩部分开展了较为详细的沉积学和地球化学研究,部分学者认为灰质韵律层是受陆源碎屑输入、上升流作用以及沉积环境周期性变化控制(罗进雄和何幼斌,2014);也有学者认为是受差异成岩作用控制(刘喜停等,2014),即成岩过程中,富含泥质的碳酸盐沉积物发生化学分异,使得钙离子重新聚集在一起形成灰岩,泥质残留便以泥灰岩为主(Raiswell, 1988; Westphal, 2006)。这种争议不仅限制了以眼球状灰岩为对象开展环境研究的进程,也制约了四川盆地这套眼球状灰岩的勘探。

非常幸运的是,在川南 DB1 井钻遇的茅口组中有近 3 m 厚的眼球状灰岩发生了白云石化作用。目前学术界认为白云石的成因模式主要有微生物白云石化模式、热液白云石化模式、渗透回流白云石化模式和埋藏白云石化模式(胡东风等,2019)。前人研究成果表明,白云石的产状和地球化学性质可以反映白云石的成因模式。例如,热液白云石一般是沿着形成热液通道的深大断裂结晶,且垂向上会形成花状、蘑菇状等不均一、不规则的产状,具有明显的 Eu 异常(陈轩等,2012)。不同性质和不同成岩阶段的白云石可以记录不同成岩阶段的流体性质和成岩过程;而同生—准同生阶段白云石的研究可以对碳酸盐岩的沉积条件和沉积环境进行一定的约束。因此,开展茅一段白云石的云化特征及过程研究对明确眼球状灰岩的沉积或成岩过程有重要意义。

本文对 DB1 井中的眼球状灰岩中的白云石开展了详细的岩石学和地球化学分析,探讨成岩流体性质和白云石化过程,有望为研究眼球状灰岩形成过程提供新的视角和数据,为非常规油气资源勘探等提供一定的依据。

1 地质背景

加里东运动奠定了四川盆地中一下二叠统的基本地貌格局,总体为西高东低(李大军等,2016)。经过泥盆—石炭纪长时间的暴露夷平之后,在中二叠世早期发生由东向西的广泛海侵,研究区内梁山组碎屑滨岸相沉积平行不整合覆盖在志留系韩家店组之上。梁山组碎屑沉积之后,继续海侵使上覆栖霞组转变为碳酸盐沉积。经过栖霞组顶部短暂海退之后,海平面继续上升,茅口组总体继承了栖霞组沉积

期相对平坦的古地貌。在茅口组底部发育一套眼球状灰岩,呈围绕川中古隆起向周缘变厚的趋势。茅口组沉积末期,受东吴运动的抬升作用影响,大部分地区的茅口组遭受了一定程度的剥蚀(梁兴等,2023)。

本文所研究的 DB1 井位于四川盆地川南低陡褶皱带(图 1)(向娟等,2011;胡明毅等,2012;梁兴等,2023),研究区茅口组自下而上可以分为四段:茅一段主要为灰黑色眼球状灰岩,眼球和眼皮层层厚 10~20 cm,自下而上眼球发育频次增加,眼球内灰质含量逐渐升高,眼皮颜色变深;茅二段主要为灰色、深灰色厚层块状泥晶灰岩,泥质含量低;茅三段以一套浅灰色、灰白色亮晶生物碎屑灰岩为主,颗粒含量高;茅四段以黑灰色泥晶灰岩、生物碎屑灰岩为主。

研究层位所在的茅口组一段自上而下又可以细分为 a、b、c 各 3 个亚段,DB1 井中二叠系茅口组一段的茅—c 亚段,深度为 2 720.00~2 729.82 m,自然伽马值相对较低(图 1)。主要发育灰色泥晶生屑灰岩,夹有灰黑色泥质灰岩和含泥灰岩、云质灰岩,含滑石团块或条带。

2 样品与实验分析

21 件样品取自 DB1 井茅一段 2 724.74~2 729.82 m(图 2),其中眼球状灰岩的眼皮部分 5 件,眼球部分 5 件、眼皮状云质灰岩(I)6 件(泥质云岩)、眼皮状云质灰岩(II)3 件(灰质云岩)、眼球状云质灰岩 2 件(含云质灰岩),样品编号即对应其深度。本次研究对这 21 份样品进行了岩石学和地球化学分析。岩石学分析在西南石油大学完成,地球化学分析在广州澳实矿物实验室完成。

新鲜岩石磨制成 30 μm 厚的薄片后,经茜素红溶液染色,利用 Olympus Microscope BH-2 偏光显微镜进行薄片鉴定。阴极发光分析在 CL8200 MK-5 阴极发光仪(配合 Leica 显微镜)下进行,测试条件选择束电压 9 kV,束电流 300 μA 。

主量元素分析样品研磨至 200 目以下,称取两份粉末样品,一份加入含硝酸锂的硼酸锂—硝酸锂熔融助熔剂,充分混合高温熔融,用 PANalytical PW2424 型 X 射线荧光光谱仪分析(RD<5%)。另一份放入马弗炉中,于 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 灼烧,分析烧矢量。

微量元素分析研磨至 200 目以下,用高氯酸、硝酸、氢氟酸和盐酸消解后用 Agilent 5110 电感耦合等

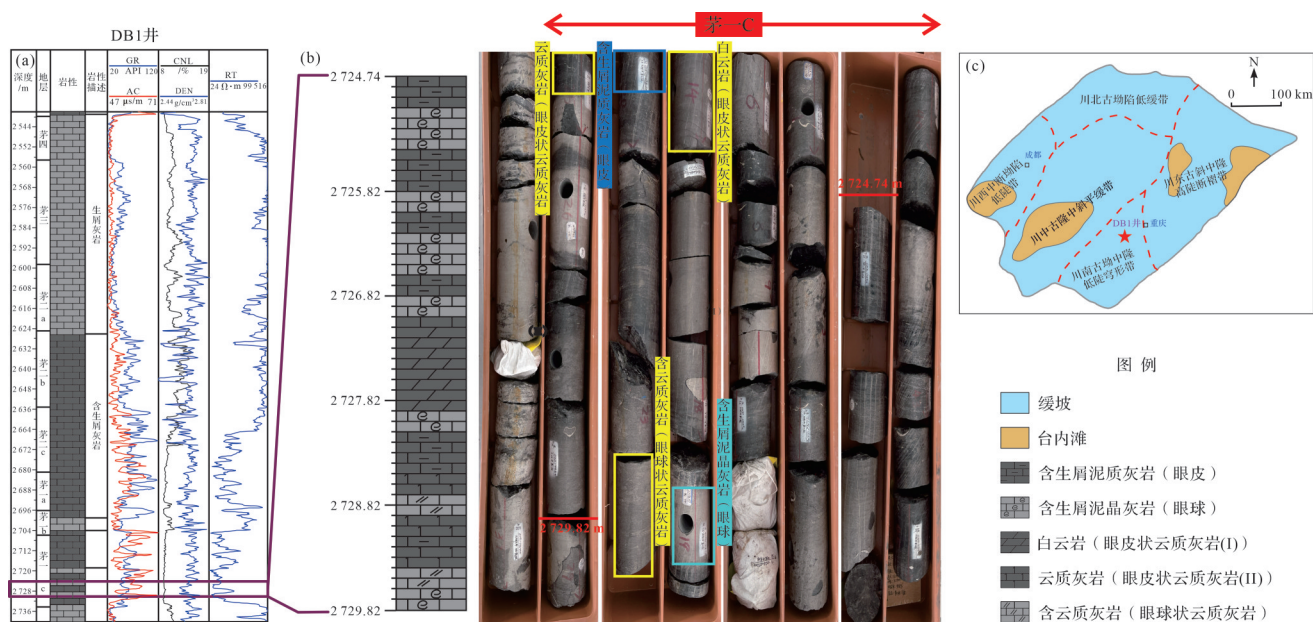


图1 DB1井位置及综合柱状图

(a) DB1井综合柱状图; (b) DB1井构造位置及四川盆地茅一段沉积相带(据梁兴等, 2023修改); (c) 研究层位岩性柱状图及岩心(据向娟等, 2011; 胡明毅等, 2012修改)

Fig.1 Location and logs of well DB1

(a) logs of well DB1; (b) location of well DB1 and sedimentary phase in the First member of the Maokou Formation, Sichuan Basin (modified from Liang *et al.*, 2023); (c) lithological histogram and core of research member (modified from Xiang *et al.*, 2011; Hu *et al.*, 2012)

离子发射光谱进行分析(RD<10%)。稀土元素分析用硼酸锂($\text{LiBO}_2/\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$)熔剂混合均匀,在熔炉中于1 025℃熔融。待熔融液冷却,消解后用Agilent 7900等离子体质谱仪进行测试(RD<10%)。

碳氧同位素分析的样品研磨至200目以下,72℃浓磷酸消解4h,产生的 CO_2 用同位素质谱仪(CF-IRMS)分析 $\delta^{13}\text{C}$ (RSD<0.1‰, V-PDB标准化)和 $\delta^{18}\text{O}$ (RSD<0.5‰, V-PDB标准化)。

本次研究对同一件样品分别开展了醋酸可溶组分和不可溶组分的锆同位素分析,样品研磨至200目以下,加入5 mL浓度为1 mol/L的醋酸,超声溶解12h,离心15 min。取上层清液进行锆同位素分析,获得醋酸可溶组分的锆同位素。对于醋酸不溶的溶解残渣加入5 mL的1 mol/L的硝酸溶解后用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)分析醋酸不溶组分锆同位素(RSD<0.1‰)。

3 结果

3.1 岩石学特征

研究层段主要发育眼球状灰岩、泥质白云岩、灰质云岩和含云质灰岩,为行文方便,将眼球状灰岩分为眼皮和眼球两部分,同时将泥质白云岩和灰质云

岩分别称作眼皮状云质灰岩(I)和眼皮状云质灰岩(II),将含云质灰岩称作眼球状云质灰岩,下文详细描述了其岩石学特征。

3.1.1 含生屑泥质灰岩(眼皮)

茅一段眼皮以深灰色含生屑泥质灰岩为主,包裹眼球呈渐变接触。垂向上由茅一c亚段向上到茅一a亚段,眼皮的占比先降低再升高,且眼皮与眼球渐变过渡带先变窄再变宽。

镜下观察发现眼皮中基质和胶结物占55%,其中泥质含量约10%,泥晶方解石占45%;眼皮的生屑含量约45%。眼皮中生屑多为软体动物碎屑和腕足类化石,颗粒大小在300~500 μm ,且多发生重结晶作用。镜下可见溶蚀孔,溶孔边缘呈港湾状,孔径约为60 μm (图2a,b)。眼皮中生物破碎程度高,定向排列(图2c)。

3.1.2 含生屑泥晶灰岩(眼球)

茅一段眼球以含生屑泥晶灰岩为主,呈浅灰色椭球状。由茅一c亚段向上到茅一a亚段,眼球逐渐增多变大然后再减少变小。

镜下观察发现眼球基质含量与眼皮大体相当,但基质中泥质含量明显降低。生屑含量也明显低于眼皮,约35%,且生屑颗粒大多相对较小,约100~

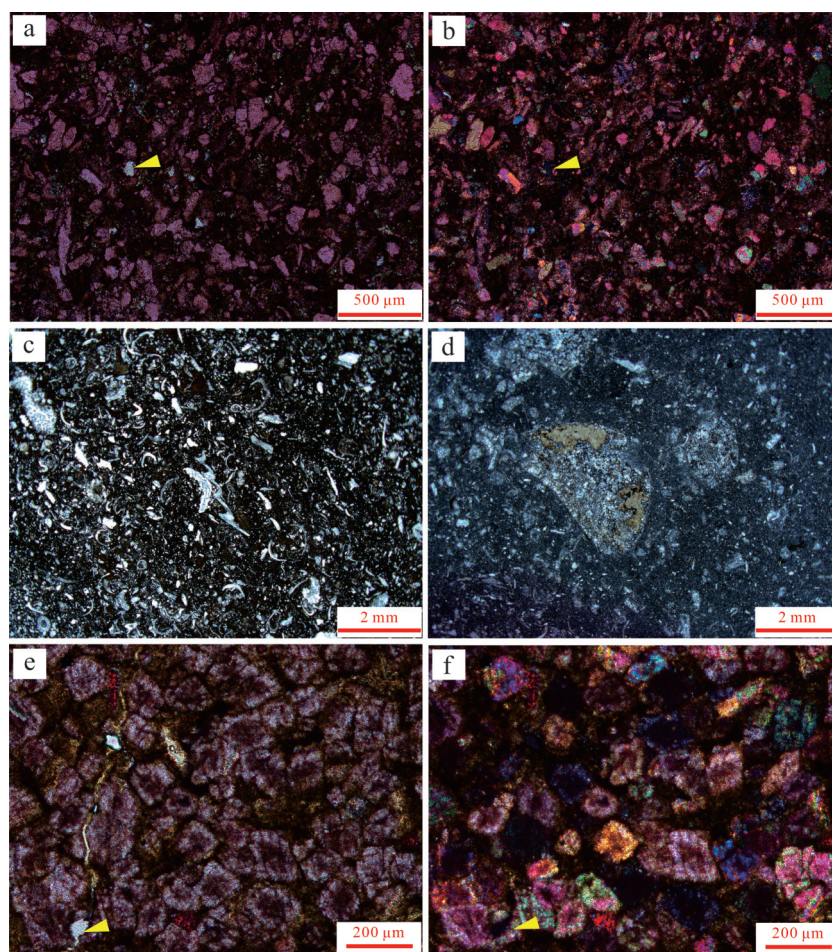


图2 DB1井眼球状灰岩镜下照片

(a)眼皮,发育溶蚀孔,2 727.10 m,单偏光(-);(b)同a,正交偏光(+);(c)眼皮,2 726.66 m,(-);(d)眼球,2 729.19 m,(-);(e)眼皮状云质灰岩(I),发育溶蚀孔,2 727.49 m,(-);(f)同e,(+)

Fig.2 Microscopic photographs of limestone-marl alteration from well DB1

(a) eyelid-like marlstone, develop with dissolving holes, 2 727.10 m, (-); (b) same as a, (+); (c) eyelid-like marlstone, 2 726.66 m, (-); (d) eyeball-like limestone, 2 729.19 m, (-); (e) eyelid-like dolomitic limestone I, develop with dissolving holes, 2 727.49 m, (-); and (f) same as e, (+)

300 μm ,多为腕足、有孔虫和藻类等,排列无定向性,未观察到溶蚀孔(图2d)。

3.1.3 泥质云岩(眼皮状云质灰岩(I))及灰质云岩(眼皮状云质灰岩(II))

白云石化作用主要发育在茅一c亚段的下部,且主要发育在眼球状灰岩的眼皮部分(图3a,b),眼球部分也偶见局部云化(图3c)。且由眼皮部分到眼球部分的白云石化程度逐渐降低(图3d~i),阴极发光亮度逐渐降低(图3j~l)。

眼皮状云质灰岩(I)中的白云石晶粒大小在80~100 μm ,具雾心亮边。白云石含量为60%,晶体边界平直,自形程度高,白云石晶粒之间为点线接触(图3d,g)。样品具有明显的环带阴极发光特征(图3j)。该类岩石主要发育在2 727.13~2 727.84 m,生屑含量

在5%左右,大多为藻类和腕足,生屑颗粒大小与眼皮部分一致,发育晶间孔和准同生期溶蚀(图2e,f)。

眼皮状云质灰岩(II)发育在DB1井中的2 728.60~2 729.50 m,该类岩石中泥质和生屑的含量稍高于泥质云岩。白云石含量为50%,晶粒大小80~100 μm ,白云石晶体边界平直,自形程度相对较高,白云石晶粒之间多为点接触或者漂浮在泥质或泥灰质基质中(图3e,h),阴极发光的环带特征不清晰(图3k)。

3.1.4 含云质灰岩(眼球状云质灰岩)

在DB1井中,眼球状云质灰岩发育程度较差,在研究层位中含量较低,发育深度恰好与眼皮状云质灰岩(II)一致。不同的是方解石含量相对较高、泥质含量相对较低,云化程度较低,晶粒大小为100~

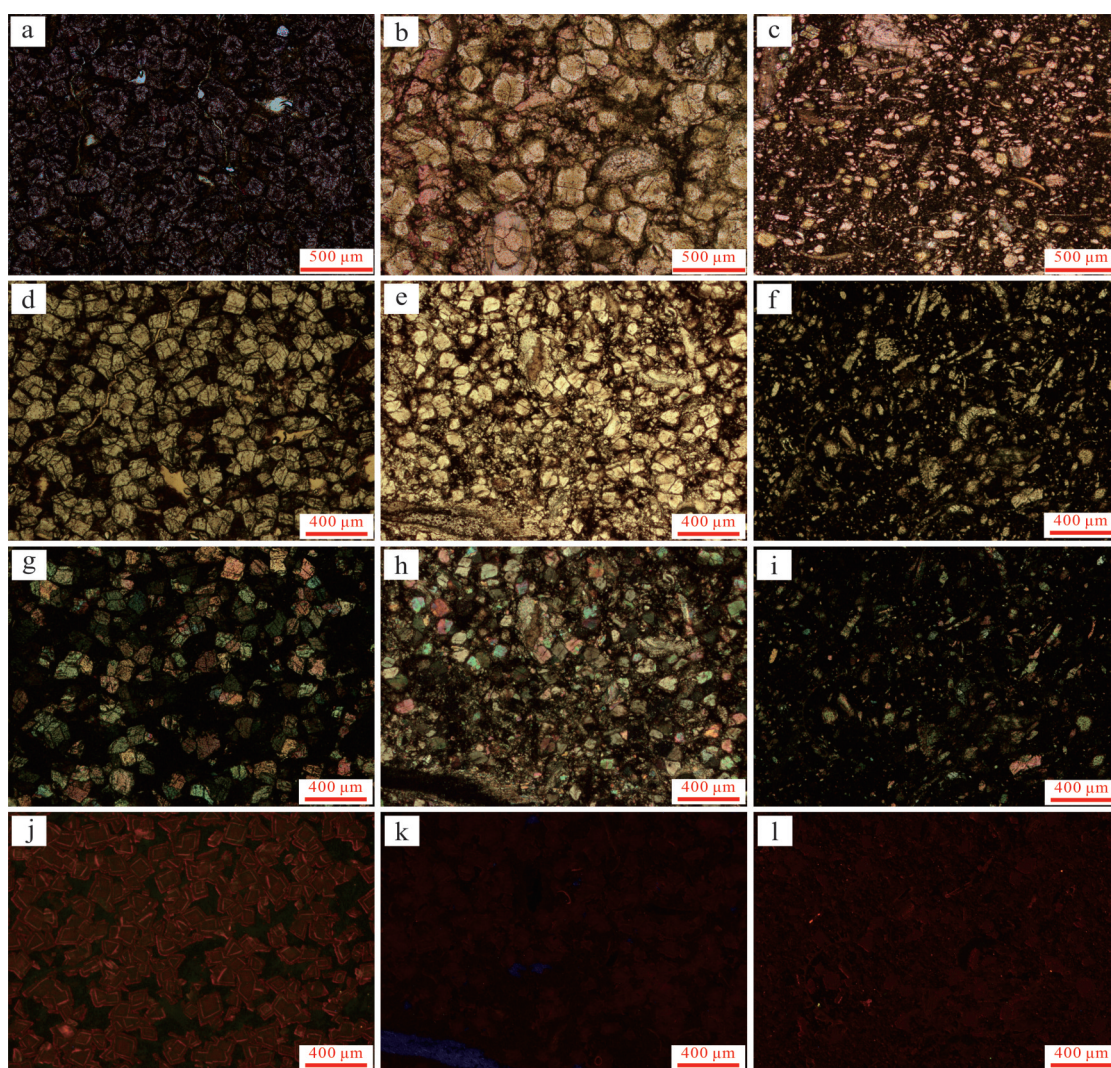


图3 DB1井白云石的镜下照片和阴极发光

(a)眼皮状云质灰岩(I), 2 727.49 m, (-); (b)眼皮状云质灰岩(II), 2 729.42 m, (-); (c)眼球状云质灰岩, 2 728.88 m, (-); (d)同a, 不同视域; (e)同b, 不同视域; (f)同c, 不同视域; (g)同d, (+); (h)同e, (+); (i)同f, (+); (j)同d, 阴极发光; (k)同e, 阴极发光; (l)同f, 阴极发光

Fig.3 Cathodoluminescence and microscopic photographs of dolomitic marlstone and limestone from well DB1

(a) eyelid-like dolomitic limestone (I), 2 727.49 m, (-); (b) eyelid-like dolomitic limestone (II), 2 729.42 m, (-); (c) eyeball-like dolomitic marl, 2 728.88 m; (d) same as a, different perspectives; (e) same as b, different perspectives; (f) same as c, different perspectives; (g) same as d, (+); (h) same as e, (+); (i) same as f, (+); (j) same as d, cathodoluminescence; (k) same as e, cathodoluminescence; and (l) same as f, cathodoluminescence

120 μm ,白云石含量约为20%。镜下可见生屑颗粒大小、含量与眼球状灰岩的眼球部分一致,白云石晶体自形程度较差,多为半自形晶并呈分散状漂浮在残余的灰质成分之间(图3f,i),阴极发光环带极不清晰(图3l)。

3.2 地球化学特征

3.2.1 主微量元素

从21件样品的分析测试结果来看,灰岩样品(包括眼皮和眼球)具有相对高的CaO和较低的MgO含量(表1)。眼皮状云质灰岩(I)的CaO最低(平均值为31.03%),但MgO最高(平均值为17.5%)。

对于灰岩样品来讲,眼皮的Fe、Mn和Sr含量(平均值分别为0.26%、 11.6×10^{-6} 、 1.489×10^{-6})明显比眼球的Fe、Mn、Sr含量高(平均值分别为0.03%、 9.6×10^{-6} 、 1.2474×10^{-6})。对于发生云化的样品,Fe、Mn和Sr含量在眼皮状云质灰岩(I)中最高,分别为0.18%、 15.17×10^{-6} 和 1.250×10^{-6} ,其次为眼皮状云质灰岩(II)(0.11%、 12.67×10^{-6} 、 1.24833×10^{-6}),眼球状云质灰岩具有最低的Fe和Mn以及稍高的Sr含量(0.05%、 12×10^{-6} 、 1.310×10^{-6})。特别值得注意的是,眼皮状云质灰岩(I)和(II)相对眼皮具有更低的Fe、Sr和更高Mn含量;而眼球状云质灰岩的Fe、Mn和Sr含量要高于眼球(表1)。

表1 DB1井碳酸盐岩主微量元素含量

Tabel 1 Main and trace element contents of carbonates from well DB1

岩性	样品号	CaO/%	MgO/%	Na ₂ O/%	Al ₂ O ₃ /%	Ti/%	Fe/%	Mn/×10 ⁻⁶	Sr/×10 ⁻⁶	Zr/×10 ⁻⁶
眼皮	2 724.74	43.70	5.27	0.16	0.32	3.10	0.12	8.00	1 605	0.01
	2 725.58	51.00	2.11	0.16	0.38	4.10	0.15	9.00	1 750	0.01
	2 726.10	49.20	2.27	0.18	0.43	3.80	0.12	10	1 720	0.01
	2 726.66	36.90	4.56	0.30	1.21	13.10	0.49	16.00	1 115	0.04
	2 727.10	36.40	5.57	0.35	1.47	18.70	0.44	15.00	1 255	0.05
平均值		43.44	3.96	0.23	0.76	8.56	0.26	11.60	1 489	0.03
眼球	2 725.26	53.90	1.10	0.07	0.08	1.00	0.04	9.00	1 730	<0.005
	2 725.75	54.30	1.18	0.07	0.08	1.00	0.04	9.00	1 315	<0.005
	2 726.34	54.00	1.15	0.07	0.09	1.20	0.03	11.00	1 670	<0.005
	2 726.80	53.50	1.38	0.07	0.09	1.40	0.02	9.00	767	<0.005
	2 729.19	54.50	1.17	0.05	0.02	<0.50	0.01	10.00	755	<0.005
平均值		54.04	1.20	0.06	0.07	1.15	0.03	9.60	1 247	<0.005
眼皮状云质灰岩(I)	2 727.13	27.90	17.65	0.31	1.02	9.00	0.29	16.00	1 185	0.03
	2 727.30	30.30	17.90	0.20	0.70	6.10	0.21	16.00	1 285	0.02
	2 727.49	27.50	18.75	0.24	0.77	6.40	0.26	19.00	1 185	0.02
	2 727.65	33.10	17.90	0.15	0.36	3.10	0.09	13.00	1 300	0.01
	2 727.67	32.90	18.10	0.13	0.36	4.40	0.09	13.00	1 285	0.01
	2 727.84	34.50	14.70	0.24	0.60	5.30	0.12	14.00	1 260	0.02
平均值		31.03	17.50	0.21	0.64	5.72	0.18	15.17	1 250	0.02
眼皮状云质灰岩(II)	2 728.68	34.90	10.95	0.13	0.21	2.00	0.05	12.00	1 135	0.01
	2 729.05	32.90	10.90	0.22	0.43	4.40	0.14	13.00	1 295	0.01
	2 729.42	40.50	6.78	0.20	0.40	3.70	0.13	13.00	1 315	0.01
平均值		36.10	9.54	0.18	0.35	3.37	0.11	12.67	1 248	0.01
眼球状云质灰岩	2 728.88	42.30	10.00	0.08	0.06	0.80	0.03	11.00	1 260	<0.005
	2 729.61	36.30	15.05	0.09	0.15	2.10	0.06	13.00	1 360	0.01
平均值		39.30	12.53	0.09	0.10	1.45	0.05	12.00	1 310	0.01

注:部分样品元素含量未检出时不计入平均值的计算。

其他重要的元素如 Na、Al、Ti 和 Zr,在眼皮中含量最高,眼球中次之。在发生云化的样品中,这些元素在眼皮状云质灰岩(I)中最高,而眼球状云质灰岩最低。

21 件样品的 Σ REY 含量平均值为 11.09×10^{-6} ,在二叠纪海相碳酸盐岩稀土元素含量范围内 ($<20 \times 10^{-6}$;胡文瑄等,2010),但明显低于陆源碎屑沉积物 Σ REY 含量 (100×10^{-6})。总体来看,上眼皮 Σ REY 含量最高,其次为眼皮状云质灰岩(I)和(II),眼球和眼球状云质灰岩最低(表2)。

所有样品的 δ Ce、 δ Eu 值均较为接近,灰岩类的 δ Ce 平均值为 1.17 (δ Ce=Ce/Ce^{*}=Ce_{SN}/(0.5La_{SN}+0.5Pr_{SN})), δ Eu 平均值为 0.93 (δ Eu=Eu/Eu=Eu_{SN}/(0.5Sm_{SN}+0.5Gd_{SN}));云化样品类的 δ Ce 平均值为 1.28, δ Eu 平均值为 0.97,样品总体表现为 Ce 正异常, Eu 弱负异常。

除眼皮状云质灰岩(I)的 Y/Ho 小于 40 外(平均为 34),其余样品的 Y/Ho 均与典型海相沉积物 Y/Ho 比值一致(40~70)。其中眼球的 Y/Ho(平均值为 60)最高,其余眼皮、眼皮状云质灰岩(II)以及眼球状云质灰岩的 Y/Ho 相近,平均值分别为 44、44 和 43。

经过北美页岩(NASC)标准化后,眼皮部分、眼球部分与眼皮状云质灰岩(I)类的稀土元素配分模式均较为平坦,但眼皮状云质灰岩(II)与眼球状云质灰岩的稀土元素模型呈现出轻稀土(LREE)相对亏损,重稀土(HREE)相对富集,表现为左倾型(图4)。

3.2.2 稳定碳、氧同位素

所分析样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 $\delta^{18}\text{O}$ 值均在二叠纪海相腕足类化石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(0~4.8‰)和 $\delta^{18}\text{O}$ 值(-10.0‰~-5.0‰)的范围内(Veizer *et al.*, 1999)。但眼皮的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于眼球的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值(表3)。图5清晰地表明眼皮状云质灰岩(I)和眼球状云质灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ 、

表2 DB1井碳酸盐岩稀土元素含量(×10⁻⁶)
Tabel 2 Rare earth elements in carbonates from well DB1 (×10⁻⁶)

岩性	样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREY	Y/Ho	δCe	δEu	ΣLREE/ ΣHREE
眼皮	2 724.74	2.40	4.50	0.37	1.40	0.27	0.07	0.3	0.05	0.31	0.07	0.2	0.03	0.18	0.03	2.8	13.02	40	1.08	1.07	7.45
	2 725.58	1.50	2.70	0.20	0.80	0.27	0.04	0.2	0.02	0.18	0.04	0.12	0.02	0.15	0.02	1.1	7.32	47	1.10	0.89	7.76
	2 726.10	0.90	2.00	0.21	0.80	0.15	0.03	0.12	0.02	0.14	0.03	0.12	0.02	0.12	0.02	1.6	6.28	48	1.06	1.05	6.93
	2 726.66	2.90	7.70	0.73	2.70	0.49	0.07	0.37	0.06	0.35	0.09	0.29	0.05	0.30	0.06	3.8	19.96	40	1.22	0.77	9.29
	2 727.10	4.60	13.80	1.14	4.30	0.84	0.15	0.69	0.11	0.67	0.14	0.45	0.07	0.46	0.08	4.8	32.30	36	1.39	0.93	9.30
平均值		2.46	6.14	0.53	2.00	0.40	0.07	0.34	0.05	0.33	0.07	0.24	0.04	0.24	0.04	2.82	15.78	42.12	1.17	0.94	8.15
眼球	2 725.26	0.40	1.30	0.05	0.20	0.04	<0.02	<0.05	0.01	<0.05	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.30	<2.39	60.00	2.02	—	—
	2 725.75	<0.10	<0.10	<0.02	<0.10	<0.03	<0.02	<0.05	<0.01	<0.05	<0.01	<0.03	<0.01	0.04	<0.01	0.30	<0.34	70.00	—	—	—
	2 726.34	0.60	1.20	0.11	0.40	0.08	0.02	0.09	0.01	0.08	0.02	0.07	0.02	0.06	0.01	0.80	3.57	60.00	1.07	1.10	6.69
	2 726.80	0.70	2.20	0.21	0.70	0.09	<0.02	0.09	0.01	0.06	0.01	0.03	<0.01	0.07	0.01	0.90	<5.08	40.00	1.31	—	—
	2 729.19	<0.10	0.10	<0.02	<0.10	<0.03	<0.02	<0.05	<0.01	<0.05	0.01	<0.03	<0.01	0.03	0.01	0.60	<0.75	70.00	—	—	—
平均值		0.57	1.20	0.12	0.43	0.07	0.02	0.09	0.01	0.07	0.01	0.04	0.02	0.05	0.01	0.58	3.57	60.00	—	—	—
眼皮状云质灰岩(I)	2 727.13	1.30	3.80	0.34	1.30	0.24	0.05	0.23	0.04	0.21	0.04	0.12	0.02	0.17	0.03	1.70	9.59	36.00	1.32	1.00	8.17
	2 727.30	1.20	3.30	0.34	1.20	0.17	0.03	0.16	0.03	0.16	0.03	0.11	0.02	0.14	0.02	1.40	8.31	37.50	1.19	0.86	9.31
	2 727.49	3.20	7.70	0.72	2.80	0.48	0.06	0.33	0.05	0.30	0.06	0.19	0.03	0.18	0.03	2.20	18.33	32.86	1.17	0.71	12.79
	2 727.65	0.40	1.80	0.14	0.40	0.05	<0.02	0.06	0.01	0.06	0.02	0.03	0.01	0.07	0.01	0.60	<3.66	30.00	1.72	—	—
	2 727.67	0.80	1.90	0.17	0.60	0.07	0.02	0.09	0.02	0.10	0.02	0.06	0.01	0.07	0.01	0.90	4.84	30.00	1.19	1.16	9.37
平均值		2 727.84	1.40	0.43	1.60	0.28	0.05	0.21	0.03	0.20	0.04	0.13	0.02	0.15	0.02	1.80	10.56	38.33	1.24	0.97	9.95
眼皮状云质灰岩(II)		1.38	3.78	0.36	1.32	0.22	0.04	0.18	0.03	0.17	0.04	0.11	0.02	0.13	0.02	1.43	10.33	34.12	1.30	—	—
	2 728.68	0.20	0.60	0.06	0.20	<0.03	<0.02	0.10	0.01	0.09	0.03	0.09	0.01	0.10	0.02	1.60	<3.11	45.00	1.25	—	—
	2 729.05	0.80	1.30	0.15	0.60	0.13	0.03	0.18	0.03	0.21	0.05	0.17	0.02	0.13	0.02	2.00	5.82	47.50	0.86	0.90	3.72
	2 729.42	0.40	0.50	0.10	0.30	0.06	0.03	0.22	0.03	0.20	0.04	0.13	0.02	0.13	0.02	2.10	4.28	40.00	0.58	0.96	1.76
	平均值		0.47	0.80	0.10	0.37	0.10	0.03	0.17	0.02	0.04	0.13	0.02	0.12	0.02	1.90	5.05	44.17	0.90	—	—
眼球状云质灰岩	2 728.88	0.30	0.30	<0.02	<0.10	<0.03	<0.02	<0.05	<0.01	<0.05	0.01	<0.03	0.01	0.04	<0.01	0.50	<1.16	70.00	—	—	—
	2 729.61	0.7	1.30	0.11	0.4	0.11	0.03	0.15	0.02	0.11	0.02	0.07	0.02	0.07	0.01	1.00	<2.13	43.33	1.24	—	—
平均值		0.50	0.80	0.11	0.40	0.11	0.03	0.15	0.02	0.11	0.02	0.07	0.02	0.06	0.01	0.75	—	43.67	—	—	—

注:部分样品元素含量未检出时不计入平均值的计算。

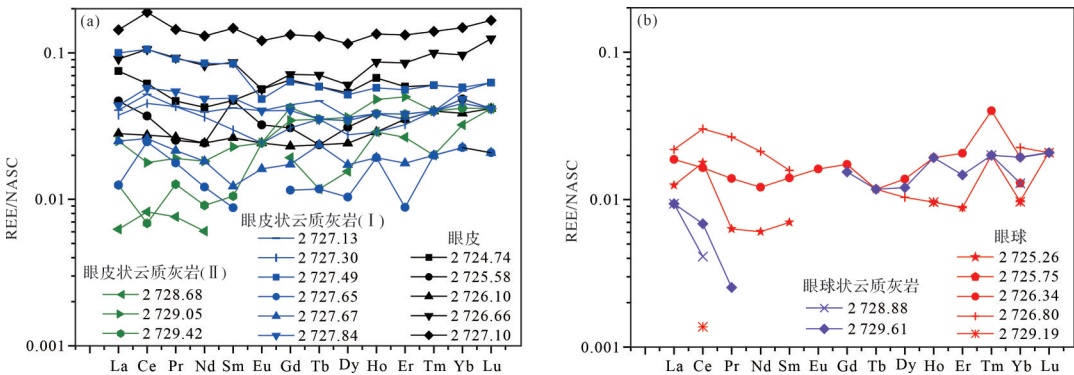


图4 DB1井碳酸盐岩稀土元素配分模式图

(a)眼皮和眼皮状云质灰岩(I)、眼皮状云质灰岩(II);(b)眼球和眼球状云质灰岩

Fig.4 Rare earth elements patterns of carbonates from well DB1

(a) eyelid-like marlstone and eyelid-like dolomitic marlstone (I), eyelid-like dolomitic marlstone (II); (b) eyeball-like limestone and eyeball-like dolomitic limestone

表3 DB1井碳酸盐岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值以及稳定碳、氧同位素 (V-PDB)
Table 3 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$, and $\delta^{18}\text{O}$ of carbonates from well DB1 (V-PDB)

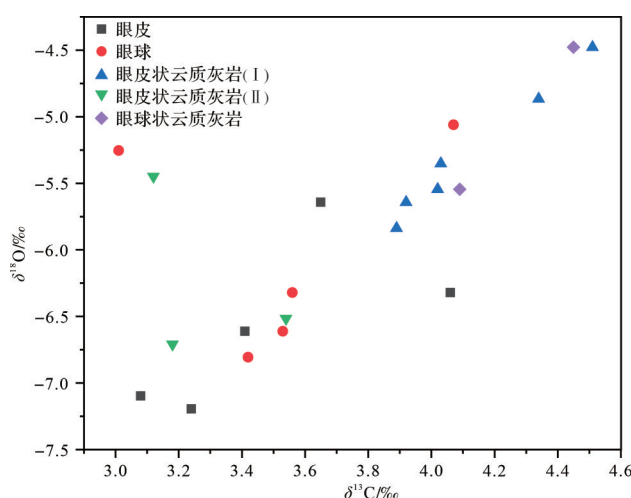
岩性	样品号	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (醋酸可溶)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (醋酸不溶)	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$
眼皮	2 724.74	0.707 164	0.707 810	4.06	-6.32
	2 725.58	0.707 130	0.707 647	3.24	-7.19
	2 726.10	0.707 140	0.708 192	3.41	-6.61
	2 726.66	0.707 162	0.711 964	3.65	-5.64
	2 727.10	0.707 174	0.709 636	3.08	-7.10
平均值		0.707 154	0.709 050	3.49	-6.57
眼球	2 725.26	0.707 187	0.707 556	3.56	-6.32
	2 725.75	0.707 110	0.707 511	3.53	-6.61
	2 726.34	0.707 098	0.707 554	3.42	-6.81
	2 726.80	0.707 092	0.708 344	4.07	-5.06
	2 729.19	0.707 107	0.707 322	3.01	-5.25
平均值		0.707 119	0.707 657	3.52	-6.01
眼皮状云质灰岩(I)	2 727.13	0.707 129	0.710 585	3.89	-5.84
	2 727.30	0.707 107	0.710 548	3.92	-5.64
	2 727.49	0.707 114	0.710 131	4.02	-5.55
	2 727.65	0.707 077	0.708 878	4.34	-4.87
	2 727.67	0.707 118	0.708 299	4.51	-4.48
	2 727.84	0.707 134	0.708 854	4.03	-5.35
平均值		0.707 113	0.709 549	4.12	-5.29
眼皮状云质灰岩(II)	2 728.68	0.707 144	0.707 311	3.54	-6.52
	2 729.05	0.707 147	0.713 070	3.18	-6.71
	2 729.42	0.707 149	0.712 187	3.12	-5.45
平均值		0.707 147	0.710 856	3.28	-6.22
眼球状云质灰岩	2 728.88	0.707 106	0.708 069	4.09	-5.55
	2 729.61	0.707 099	0.707 423	4.45	-4.48
平均值		0.707 102	0.707 746	4.27	-5.01

$\delta^{18}\text{O}$ 值均高于灰岩类,但眼皮状云质灰岩(II)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 $\delta^{18}\text{O}$ 值与眼皮相近。

3.2.3 锶同位素

本次研究分别对样品的稀醋酸可溶组分(碳酸

盐岩)和稀醋酸不可溶残渣(陆源碎屑)进行了锶同位素分析,所有样品的醋酸可溶组分 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值皆落于同期海水范围之内(0.706 62~0.708 21;黄思静, 1997;Burke *et al.*, 1999),且眼皮的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(平均值

图5 DB1井碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 散点图Fig.5 Scattered diagram of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of carbonates from well DB1

为0.707 154)高于眼球(平均值为0.707 119)(表3)。这两类灰岩的醋酸不可溶组分,眼球的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值变化范围明显大于眼皮,且眼球的醋酸不可溶组分 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值(0.707 657)同样稍高于眼皮(平均值为0.709 050)。

对于三类发生云化的岩石(稀醋酸可溶组分)而言,眼皮状云质灰岩(II)具有最高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(与眼皮相近),其次为眼皮状云质灰岩(I)和眼球状云质灰岩,且眼球状云质灰岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与眼球相近(图6a)。对于醋酸不可溶组分而言,眼皮状云质灰岩(I)和(II)的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 变化范围同样较眼球状云质灰岩大,且总体上眼皮状云质灰岩(I)和(II)酸不溶组分的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 要高于眼球状云质灰岩。此外,眼球状云质灰岩酸不溶组分的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与眼球相近(图6b)。

4 讨论

4.1 白云石化流体性质

地史上多数白云石是成岩作用的产物,例如准同生期白云石化、埋藏期白云石化和热液白云石化等(Warren, 2000)。不同云化过程需要不同性质的成岩流体,因此重建白云石化流体性质是识别白云石成因的关键。常见的白云石化流体有海水、大气淡水、地层热水或热液(赫云兰等, 2010)。

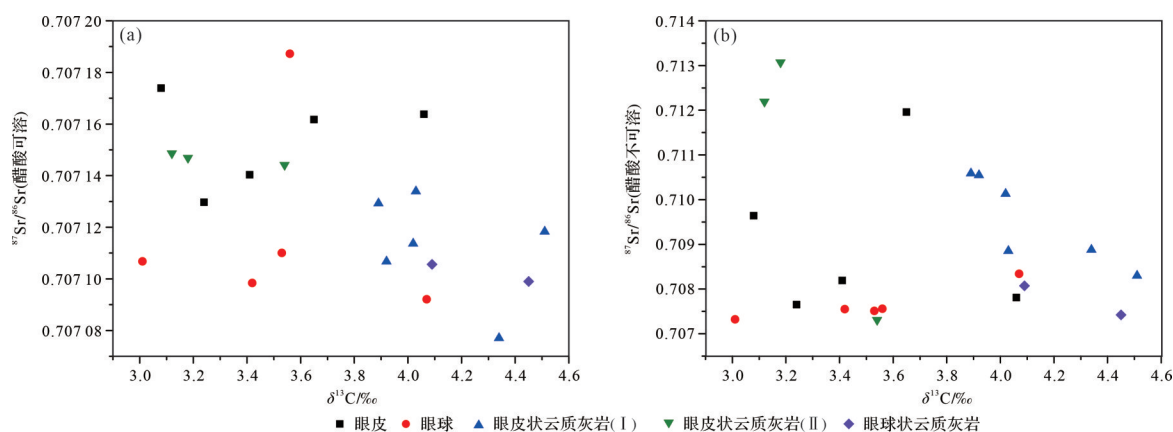
白云石中稀土元素特征主要受云化流体性质控制(Luan *et al.*, 2022)。云化样品的 ΣREY 含量远低于陆源碎屑沉积物的 ΣREY 含量(100×10^{-6}),且在二叠纪海相碳酸盐岩稀土元素含量范围内($< 20 \times 10^{-6}$; 胡文瑄等, 2010),表明云化流体可能总体为沉积期

海水。

$\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 也是重建云化流体性质的重要指标(黄思静等, 1997)。前人研究表明,淡水一般具有较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$,而热液一般具有正常的 $\delta^{13}\text{C}$ 和较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Warren, 2000)。云化样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 以及其醋酸可溶组分的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 均在二叠纪海水范围附近(黄思静, 1997),同样表明云化流体可能总体为沉积期海水。

稀土元素中Y和Ho的表面络合行为不同导致Y/Ho是判识流体性质的重要指标。海水中Ho的沉降速率高于Y,导致淡水中Y/Ho值比海水低(Bau, 1996)。眼皮状云质灰岩(I)的Y/Ho值平均为34.12(表2),低于二叠纪海相沉积物的Y/Ho值(40~70);此外,眼皮状云质灰岩(I)的稀土元素配分模型(图6)为平坦型,均说明其云化流体可能是混有一定淡水的海水。

一般来讲,淡水的混入会导致白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 降低, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 升高(黄思静, 1997)。但是眼皮状云质灰岩(I)的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 较临近的眼皮高,而醋酸可溶组分的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值稍低。出现这种情况可能存在两种原因:(1)眼皮状云质灰岩(I)的云化流体相比同沉积期海水,具有更高的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 以及更低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 。前人研究表明,眼皮相对发育层段沉积水体较浅,为淡化的海水(Pang *et al.*, 2021)。并且四川盆地茅一段下部整体表现为海侵(梁兴等, 2023),因此认为是海侵导致更为开阔的海水进入未完全胶结的孔隙,使之前沉积的眼皮云化。(2)孔隙水与眼皮发生了水岩反应,围岩与孔隙水发生同位素交换使云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 升高。但水岩反应也会导致孔隙水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 升

图6 DB1井碳酸盐岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 散点图

(a)醋酸可溶;(b)醋酸不可溶

Fig.6 Scattered diagram of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in carbonates from well DB1

(a) soluble fraction by acetic acid; (b) unsoluble fraction by acetic acid

高或者接近围岩,而眼皮状云质灰岩(I)的醋酸可溶组分 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比眼皮更低,因此孔隙中封存的海水并不是眼皮状云质灰岩(I)的云化流体。

此外,在云化样品中,仅眼皮状云质灰岩(I)的白云石晶体具有明显的环带阴极发光特征(图5)。阴极发光一般受白云石晶粒中Mn和Fe的含量控制,Mn是激活剂,而Fe是淬灭剂(黄思静等,2008)。这种环带表明存在周期性的Mn离子进入白云石晶粒,这与眼皮状云质灰岩(I)的Mn含量较高(表1)相一致。而淡水中的Mn元素含量高于海水,是提供Mn离子的重要潜在云化流体(Hu *et al.*, 2013)。综上所述,形成眼皮状云质灰岩(I)的云化流体为准同生期海水混有少量淡水。

相较而言,眼皮状云质灰岩(II)的白云石晶体自形程度中等,含量中等,白云石晶粒之间呈点接触或漂浮在残余的灰质中,阴极发光特征不明显。此外,稀土元素配分模式表现为与海水一致的左倾型特征,Y/Ho落在海相沉积物范围, $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与眼皮相近,均说明其云化流体可能是同期海水(于春勇等,2020;Frimmel, 2021)。

至于眼球状云质灰岩,其云化程度最低,白云石晶体自形程度和含量均较低,半自形白云石晶体漂浮在残余的灰质中,阴极发光环带极不清晰。其具有比眼球更高的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 以及相似的醋酸可溶组分 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$,表明可能是孔隙水与围岩发生了水岩反应。但眼球状云质灰岩的Y/Ho值均落在海相沉积物范围,且稀土配分模式为左倾型,因此,眼球状云质灰岩的云化流体为封存的孔隙水。

综上所述,DB1井茅一段的三类云化有对应的三种白云石化流体,流体性质均主要属于海水来源。其中眼皮状云质灰岩(I)的云化流体为混有淡水的海水,眼皮状云质灰岩(II)的云化流体是与眼皮沉积同期的海水,而眼球状云质灰岩的云化流体为封存的同时期海源流体。

4.2 白云石化过程及模式

白云石化的形成过程除了流体性质外还受到古地理格局、成岩期次等许多因素的控制,因此衍生出不同的形成模式。为重建DB1井茅一段白云石化过程,通过岩石学特征和流体性质对白云石化期次和成岩环境进行限制。

4.2.1 白云石化期次

镜下观察发现DB1井茅一段的云化程度总体较低,白云石晶粒呈分散状分布在泥晶方解石杂基和胶结物中,白云石晶粒粒度均较小($<120\ \mu\text{m}$)等特征(图3),具有典型的准同生期到早成岩期白云石化特征。与埋藏期发生的大规模云化,且白云石晶粒较大,呈镶嵌状分布的特征差异较大(Warren, 2000)。也未在DB1井发现表明白云石形成于埋藏压实阶段的典型现象,例如白云石晶粒切割缝合线等。Eu异常是识别热液云化常规的指标,一般后期热液的改造会导致Eu出现正异常(王良军等,2022)。样品的平均Eu异常值均小于1(表2),表明DB1井茅一段未发生热液白云石化(Douville *et al.*, 1999)。镜下也未观察到大量热液相关的矿物,如天青石、重晶石、萤石、石英、闪锌矿等(张涛等,2015)。因此,认为DB1井茅一段白云石化时间总体较早,主要形成于准同

生期到早成岩期,但不同类型的白云石发生云化的时间稍有差异。

岩石学观察还发现,眼皮状云质灰岩(I)的泥晶方解石基质以及白云石晶粒出现港湾状溶蚀边缘(图2e,f),发育准同生一早成岩期选择性溶蚀作用(唐雨等,2021),表明在准同生一早成岩期溶蚀作用之前(同时),眼皮已经发生了白云石化。

至于眼皮状云质灰岩(II),具有近同沉积期的 Y/Ho 、 $\delta^{13}C$ 、 $\delta^{18}O$ 及 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值,限制了云化时间为同沉积期或者准同生期。而眼球状云质灰岩具有比眼球更高的 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$,相似的醋酸可溶组分 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 表明云化流体为经过水岩反应与围岩进行元素和同位素交换的孔隙水,因此眼球状云质灰岩的云化时间应该在早成岩阶段,且晚于上述的其他类型。

综上所述,DB1井茅一段的白云石化时间均在准同生期到早成岩期,其中眼皮状云质灰岩(II)所属的云化阶段早于眼皮状云质灰岩(I),眼球状云质灰岩的云化阶段最晚。

4.2.2 白云石化环境

眼皮状云质灰岩(I)和中白云石的阴极发光具有环带特征,表明眼皮状云质灰岩(I)云化时为弱还原的成岩环境。这是由于只有在相对还原条件下 Mn^{4+} 才能被还原成 Mn^{2+} ,进入白云石晶格(Veizer, 1983)。与之相符的是,眼皮状云质灰岩(I)的 δCe 在三类发生云化的岩石中最高,平均值为1.30(表2)。一般来讲,Ce的负异常表明为氧化环境,正异常为还原环境(Kakuwa and Matsumoto, 2006)。在弱还原条件下,由黏土矿物蚀变释放Fe、Al、Ti和Zr,被流体带出体系,使得眼皮状云质灰岩(I)中Fe、Al、Ti和Zr的含量比邻近的眼皮低(表1)。例如,样品2 727.13(眼皮状云质灰岩)中这些元素含量比2 727.10(眼皮)低,但这两件样品的位置仅相差3 cm,说明沉积环境的改变可能不是导致差异的原因。

眼皮状云质灰岩(II)的 δCe 平均值为0.90,Mn元素含量和眼皮平均值接近,白云石晶粒没有阴极发光,均表明其云化环境为相对氧化。但指示陆源碎屑来源的Al、Ti和Zr元素,明显低于眼皮平均值,可能表明其陆源碎屑分解和黏土矿物蚀变程度,比眼皮状云质灰岩(I)更强烈。

至于眼球状云质灰岩,其Mn的含量高于眼球的平均含量,虽然只有一件样品获得 δCe ,但较高的 δCe (1.24)和Mn均表明,其云化环境也是相对还原环境。

此外,相对于邻近的眼球部分,眼球状云质灰岩的Fe、Al、Ti和Zr元素的含量明显较高(表1)。可能是由于眼皮沉积时水体稍深(Pang *et al.*, 2021),导致这些代表陆源碎屑含量的元素较周缘的眼球部分低,在眼皮和眼球之间形成了一定的元素含量梯度。早成岩阶段,眼皮中的黏土矿物蚀变释放这些元素,在浓度差的作用下随云化流体向眼球的孔隙水中扩散,导致这些元素在眼球状云质灰岩中富集。

综上所述,DB1井茅一段眼皮状云质灰岩(I)和眼球状云质灰岩是在相对还原条件下发生云化,而眼皮状云质灰岩(II)是在相对氧化的条件下发生云化。

4.2.3 白云石化过程及模式

综合DB1井茅一段白云石的云化流体性质、云化时间和云化环境讨论结果以及眼皮和眼球的沉积背景,提出DB1井茅一段白云石化过程及模式(图7)。

四川盆地茅一段沉积期为一个碳酸盐岩缓坡环境,地形相对平坦(任梦怡等, 2020; 梁兴等, 2023)。缓慢海侵导致四川盆地茅一段广泛发育一套眼球状灰岩。DB1井茅一段沉积时水体较浅,处于正常浪基面以上的上缓坡(胡明毅等, 2012; 许国明等, 2015)。在同沉积期—准同生阶段受频繁的海平面升降变化影响,碳酸盐上缓坡蒸发导致海水的Mg/Ca上升,相对高密度的海水下渗,不断与早期沉积的松散灰泥或文石相接触交代方解石造成较浅的眼皮发生白云石化,形成眼皮状云质灰岩(II)。在这种水文模型下,云化总体处于弱氧化环境,因此形成的白云石没有阴极发光。由于外海水持续补充,蒸发作用改变海水性质有限,使得云化流体性质总体和同沉积期海水保持一致。但是由于一方面海水云化能力有限,另外一方面沉积期相对平缓的地形,导致水文循环动力不够,因此DB1井这类白云石的云化程度低,白云石含量不高。在海水下渗的过程中,岩石中陆源碎屑和黏土矿物在准同生期分解释放的Al、Ti、Zr和Fe元素会随云化流体带出体系,导致眼皮状云质灰岩(II)中这些元素的含量比眼皮低很多。

因为上缓坡地形相对平坦,蒸发之后具有弱云化能力的海水无法到达稍深水的眼皮。在准同生期,少量的大气淡水沿眼皮孔渗层发生侧向渗透,与海水混合交代形成眼皮状云质灰岩(I)。在这个过程中由于水体相对稍深,云化环境转变为弱还原条件,

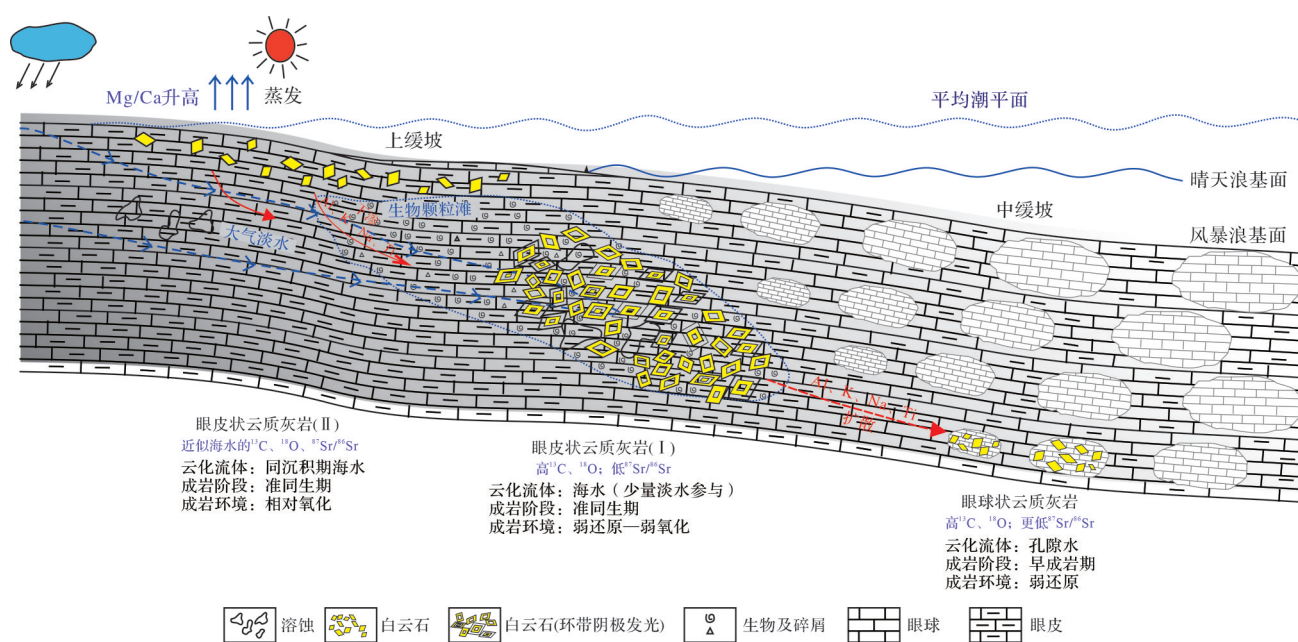


图7 DB1井眼球装灰岩—泥灰岩白云石化模式图

Fig.7 Dolomitization model of the limestone-marlstone alterations (LMAs) from well DB1

淡水带来更多的Mn在弱还原条件下还原成 Mn^{2+} 进入白云石晶格,叠加这种弱还原条件不稳定,导致形成的白云石出现环带状阴极发光。云化流体虽然有少量的淡水参与,但总体还是沉积时相对开阔一点的海水,因此其具有比眼皮稍高的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 以及稍低的醋酸可溶组分 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 。当淡水在云化流体中占比增高时,此时的流体可能对刚形成的白云石和泥灰基质是不饱和的,因此在眼皮状云质灰岩(I)中可以观察到准同生期—早成岩期的溶蚀现象,这种溶蚀主要发生在泥灰基质中(图2e,f)。同眼皮状云质灰岩(II)一样,随着云化流体的循环同样会带走因陆源碎屑和黏土矿物分解释放的Al、Ti和Zr等元素,使得眼皮状云质灰岩(I)中这些元素相对原岩发生亏损。

眼球状云质灰岩的原岩为眼球,本次研究数据发现眼球具有比眼皮更低的Ti和Zr元素(表1)。这是因为碳酸盐矿物基本不含Ti和Zr元素,较低的Ti和Zr说明陆源碎屑含量低(Bhatia and Crook, 1986),因此眼球沉积时水体深度要比眼皮深。较低的Ti和Zr元素还可以用更高的碳酸盐矿物含量稀释作用来解释,这是因为眼球的碳酸盐矿物含量要高于眼皮。值得注意的是,眼球具有比眼皮低的醋酸可溶组分 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$,以及更低的醋酸不溶组分 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 。特别是更低的醋酸不溶组分 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 反映的是眼球中长石类陆源碎屑更少,长石类矿物因含一定的Rb元

素, ^{87}Rb 会进一步衰变为 ^{87}Sr ,导致含长石矿物岩石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 高。然而,长石类矿物容易风化,一般仅在近物源区富集,因此醋酸不溶组分的低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值多与长石类矿物含量低有关,因而反映沉积时水体更深。K和Na元素在眼球中的含量远远小于眼皮就是长石类矿物低的很好证明,K和Na元素主要赋存在钾长石和钠长石中(陈武和季寿元, 1985)。此外,醋酸可溶组分 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 主要是碳酸盐组分 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$,碳酸盐组分 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 反映的是碳酸盐矿物沉淀时流体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 。一般而言海水相对淡水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 低,因此醋酸可溶组分 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 越低表明淡水越少,距离陆地越远,可能水体越深。该结论与眼皮和眼球的Y/Ho,稀土配分模式一致,眼球的Y/Ho高于眼皮,且眼皮的稀土配分模式为平坦型,眼球则为左倾型,也反映眼球沉积时水体深度较眼皮深。

由于眼球沉积时水体要比眼皮深,加上相对平坦的沉积地貌以及眼皮状云质灰岩(I)的云化消耗一定的 Mg^{2+} ,使得原本云化能力较弱的云化流体很难循环到水体更深的眼球状灰岩,并对其进行云化。因此,眼球状云质灰岩是封存在孔隙中的同沉积期海水,在早成岩阶段与围岩发生水岩反应后,对眼球进行云化形成的。沉积物中黏土矿物释放的 Mg^{2+} 以及文石质的生屑和泥晶高镁方解石和文石的新生变形可能是云化流体 Mg^{2+} 的来源(冯增昭等, 1994; 张宝民等, 2017; 何溥为等, 2021),由于这些早成岩期

矿物的蚀变作用提供的 Mg^{2+} 的数量有限,导致眼球云化形成的白云石的含量远低于眼皮。

4.3 云化过程对眼球状灰岩形成的指示

茅一段眼球状灰岩具有形成规模性气藏的源储条件(张玺华等,2018),然而关于眼球状灰岩的成因,一直存在分歧,特别是关于形成时水体的深度长期存在争论(Munnecke and Westphal, 2004; 薛武强等,2015)。

DB1井茅一段的眼球状灰岩的云化作用主要发生在眼皮中,而眼球云化少且弱。其眼皮和眼球除了上述的岩石学特征和地球化学特征差异显著,能够说明眼皮的沉积水体比眼球更浅外,其发生白云石化的过程和机制也存在显著区别。

弱蒸发的海水、有淡水混合的海水,在准同生一早成岩期对眼球状灰岩进行云化,限制了眼球状灰岩沉积的水体环境较浅。当然在准同生期或者早成岩期深水条件下,也会发生像硫酸盐还原细菌参与的白云石化(Vasconcelos and McKenzie, 1997),但是这种白云石化一般具有典型负偏的 $\delta^{13}C$,并往往伴随草莓状黄铁矿。但DB1井茅一段发生云化的岩石均具有正的 $\delta^{13}C$,且总体是为弱氧化—弱还原状态,镜下也未见大量草莓状黄铁矿。目前茅口组眼皮和眼球除了形成时水体深度存在争议外,其成因主要也有沉积(Pang *et al.*, 2021)和成岩两类不同的观点(Westphal, 2006)。深入开展DB1井茅一段眼球状灰岩云化特征和过程的研究,除了对其沉积时水体深度进行了较好的限制,也初步表明眼皮和眼球之间物质组成差异的形成要早于压实作用。DB1井茅一段眼球状云质灰岩中Na、K、Al、Ti和Zr元素含量要比眼球高,导致这种现象发生有两种可能。一种如上文所述这些元素为眼皮在准同生一早成岩期云化阶段扩散至眼球中。另外一种可能是眼皮状云质灰岩的原岩就具有高的黏土矿物,但是眼球状云质灰岩中无论是醋酸不溶组分 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 还是醋酸可溶组分 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 均和眼球类似,这表明眼球状云质灰岩的原岩不仅在沉积环境而且在黏土矿物含量上和现存的眼球一致。因此第二种情况可以排除,也就表明这些元素在眼球状云质灰岩和眼球之间的差异是在眼皮和眼球发生云化的过程中扩散作用所致。而其云化作用均发生在大量压实作用之前的准同生期到早成岩期,也就是元素的扩散早于埋藏压实作用。导致元素扩散的必要条件就是眼皮与眼球之间先存

在这些元素的浓度差,这就要求眼皮和眼球在准同生期云化作用之前就存在差异,也即如前文所述眼皮和眼球之间的物质组成差异是沉积时水体深度不同所导致的。据此可以推断眼球状灰岩是在沉积环境周期性变化下产生的,其成因应当以沉积差异为主。

前人研究表明,四川盆地茅一段处于碳酸盐岩缓坡环境(任梦怡等,2020),岩性并未发生较大的变化(张玺华等,2019),符合近地表白云石化的条件。在四川盆地茅口组一段广泛发育的眼球状灰岩中(罗进雄和何幼斌,2010),有少部分灰岩云化,这些白云石与文中的眼皮状云质灰岩(I)的白云石产状、结构相近(任海侠等,2021),因此研究其云化成因及眼球状灰岩的形成环境具有重要意义。

5 结论

(1) DB1井茅一段发育眼球状灰岩,及其云化后形成的三类岩石(眼皮状云质灰岩(I)、眼皮状云质灰岩(II)和眼球状云质灰岩)。眼皮相对眼球而言具有高的泥质含量,高Na、K、Al、Ti和Zr,高的锶同位素及稀土元素值,低的 $\delta^{13}C$ 、 $\delta^{18}O$ 值和Y/Ho值。三类发生云化的岩石中,眼皮状云质灰岩(I)云化程度最高,具有明显的阴极发光环带,平坦的稀土配分模式,相对眼皮状云质灰岩(II)具有较高的 $\delta^{13}C$ 、 $\delta^{18}O$ 值,较低的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 和Y/Ho;眼皮状云质灰岩(II)云化程度中等,左倾的稀土配分模式型,近似海水的 $\delta^{13}C$ 、 $\delta^{18}O$ 、 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 和Y/Ho值;眼球状云质灰岩云化程度最低,泥质含量也较低,平坦的稀土配分模式,相对眼皮状云质灰岩(II)较高的 $\delta^{13}C$ 、 $\delta^{18}O$ 值,较低的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值,近似海水的Y/Ho值。

(2) 眼皮状云质灰岩(I)是在准同生期,少量的大气淡水沿眼皮孔渗层发生侧向渗透,与海水混合,交代泥灰基质造成灰岩发生云化;眼皮状云质灰岩(II)是在同沉积期—准同生期,弱蒸发海水与早期沉积的松散灰泥或文石相接触云化而成;眼球状云质灰岩是封存在孔隙中的同沉积期海水,在早成岩阶段与围岩发生水岩反应后,在弱还原条件下云化而成。

(3) DB1井茅一段眼球状灰岩的云化过程从侧面表明,眼球沉积时水体较浅,且眼皮比眼球更浅。茅一段眼球状灰岩是在沉积环境周期性变化下产生的,其成因可能主要受沉积作用控制。

致谢 衷心感谢三位评审专家对本文提出的宝贵意见以及杭州地质研究院马立桥在取心过程中给予的帮助。

参考文献(References)

- 陈武,季寿元. 1985. 矿物学导论[M]. 北京:地质出版社:1-297. [Chen Wu, Ji Shouyuan. 1985. An introduction to mineralogy [M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-297.]
- 陈轩,赵文智,张利萍,等. 2012. 川中地区中二叠统构造热液白云岩的发现及其勘探意义[J]. 石油学报, 33(4): 562-569. [Chen Xuan, Zhao Wenzhi, Zhang Liping, et al. 2012. Discovery and exploration significance of structure-controlled hydrothermal dolomites in the Middle Permian of the central Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 33(4): 562-569.]
- 冯增昭,王英华,刘焕杰,等. 1994. 中国沉积学[M]. 北京:石油工业出版社:1-968. [Feng Zengzhao, Wang Yinghua, Liu Huanjie, et al. 1994. Sedimentology of China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press: 1-968.]
- 韩月卿,郝运轻,韩文彪,等. 2022. 川东南地区中二叠统茅口组一段眼球状灰岩成因机理[J]. 油气地质与采收率, 29(6): 12-21. [Han Yueqing, Hao Yunqing, Han Wenbiao, et al. 2022. Genetic mechanism of eyeball-shaped limestone in First member of Middle Permian Maokou Formation in southeast Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 29(6): 12-21.]
- 何明薇,罗进雄. 2016. 湖北兴山峡口中二叠统眼球状石灰岩特征及成因[J]. 长江大学学报(自科版), 13(14): 1-8. [He Mingwei, Luo Jinxiong. 2016. Origin and characteristics of Middle Permian eyeball-shaped limestone in Xiakou area of Xingshan county of Hubei province[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 13(14): 1-8.]
- 赫云兰,刘波,秦善. 2010. 白云石化机理与白云岩成因问题研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 46(6): 1010-1020. [He Yunlan, Liu Bo, Qin Shan. 2010. Study on the dolomitization and dolostone genesis[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 46(6): 1010-1020.]
- 何溥为,胥旺,张连进,等. 2021. 川中磨溪—高石梯地区栖霞组白云岩特征及成因机制[J]. 沉积学报, 39(6): 1532-1545. [He Puwei, Xu Wang, Zhang Lianjin, et al. 2021. Characteristics and genetic mechanism of Qixia Formation dolomite in Moxi-Gaoshiti area, central Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 39(6): 1532-1545.]
- 胡东风,王良军,黄仁春,等. 2019. 四川盆地东部地区中二叠统茅口组白云岩储层特征及其主控因素[J]. 天然气工业, 39(6): 13-21. [Hu Dongfeng, Wang Liangjun, Huang Renchun, et al. 2019. Characteristics and main controlling factors of the Middle Permian Maokou dolomite reservoirs in the eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 39(6): 13-21.]
- 胡明毅,胡忠贵,魏国齐,等. 2012. 四川盆地茅口组层序岩相古地理特征及储集层预测[J]. 石油勘探与开发, 39(1): 45-55. [Hu Mingyi, Hu Zhonggui, Wei Guoqi, et al. 2012. Sequence lithofacies paleogeography and reservoir prediction of the Maokou Formation in Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 39(1): 45-55.]
- 胡文煊,陈琪,王小林,等. 2010. 白云岩储层形成演化过程中不同流体作用的稀土元素判别模式[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 810-818. [Hu Wenxuan, Chen Qi, Wang Xiaolin, et al. 2010. REE models for the discrimination of fluids in the formation and evolution of dolomite reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 31(6): 810-818.]
- 黄思静. 1997. 上扬子地台区晚古生代海相碳酸盐岩的碳、锶同位素研究[J]. 地质学报, 71(1): 45-53. [Huang Sijing. 1997. A study on carbon and strontium isotopes of Late Paleozoic carbonate rocks in the Upper Yangtze Platform[J]. Acta Geologica Sinica, 71(1): 45-53.]
- 黄思静,卿海若,胡作维,等. 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. [Huang Sijing, Qing Hairuo, Hu Zuowei, et al. 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.]
- 李大军,陈辉,陈洪德,等. 2016. 四川盆地中二叠统茅口组储层形成与古构造演化关系[J]. 石油与天然气地质, 37(5): 756-763. [Li Dajun, Chen Hui, Chen Hongde, et al. 2016. Relationship between reservoir development in the Middle Permian Maokou Formation and paleostructure evolution in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 37(5): 756-763.]
- 梁兴,徐政语,栗维民,等. 2023. 蜀南—渝西地区中二叠统茅一段灰质源岩气储层特征及主控因素:以DB1井为例[J]. 石油实验地质, 45(4): 714-725. [Liang Xing, Xu Zhengyu, Li Weimin, et al. 2023. Characteristics and main controlling factors of the limy source rock gas reservoir in the First member of the Middle Permian Maokou Formation in the southern Sichuan and western Chongqing area: A case study of well DB 1[J]. Petroleum Geology & Experiment, 45(4): 714-725.]
- 刘瑾,夏文谦,李晶晶,等. 2019. 川东南地区茅一段储层特征分析[J]. 科技通报, 35(7): 26-32. [Liu Jin, Xia Wenqian, Li Jingjing, et al. 2019. Analysis of reservoir characteristics of the First member of Maokou Formation in southeastern Sichuan Basin[J]. Bulletin of Science and Technology, 35(7): 26-32.]
- 刘喜婷,颜佳新,马志鑫,等. 2014. 华南栖霞组灰岩—泥灰岩韵律层的成因[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 39(2): 155-164. [Liu Xiting, Yan Jiaxin, Ma Zhixin, et al. 2014. Origination of limestone-marl alternations from Qixia Formation of South China [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 39(2): 155-164.]
- 罗进雄,何幼斌. 2010. 中—上扬子地区二叠系眼球状石灰岩特征及成因研究[J]. 地质论评, 56(5): 629-637. [Luo Jinxiong, He Youbin. 2010. Origin and characteristics of Permian eyeball-shaped

- limestones in Middle-Upper Yangtze region[J]. *Geological Review*, 56(5): 629-637.]
- 罗进雄,何幼斌. 2014. 中上扬子地区二叠系烃源岩特征[J]. *天然气地球科学*, 25(9): 1416-1425. [Luo Jinxiong, He Youbin. 2014. Characteristics of the Permian source rocks in the Middle and Upper Yangtze region[J]. *Natural Gas Geoscience*, 5(9): 1416-1425.]
- 罗进雄,何幼斌,何明薇,等. 2019. 华南中二叠统眼球状石灰岩特征及成因的思考[J]. *古地理学报*, 21(4): 613-626. [Luo Jinxiong, He Youbin, He Mingwei, et al. 2019. Thoughts on characteristics and origin of the Middle Permian eyeball-shaped limestone in South China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 21(4): 613-626.]
- 任海侠,林小兵,刘叶,等. 2021. 川西南二叠系茅口组一段滑石特征及其形成机理:以A1井茅一段样品为例[J]. *石油实验地质*, 43(6): 1038-1047. [Ren Haixia, Lin Xiaobing, Liu Ye, et al. 2021. Characteristics and formation mechanism of talc in Permian Maokou Formation, southwestern Sichuan Basin: A case study of First member of Maokou Formation in well A1[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 43(6): 1038-1047.]
- 任梦怡,江青春,汪泽成,等. 2020. 川南地区中二叠统茅口组成岩流体来源及演化过程[J]. *天然气工业*, 40(4): 40-50. [Ren Mengyi, Jiang Qingchun, Wang Zecheng, et al. 2020. Source and evolution of diagenetic fluid in the Middle Permian Maokou Formation in the southern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 40(4): 40-50.]
- 宋翠玉,吕大炜. 2022. 米兰科维奇旋回时间序列分析法研究进展[J]. *沉积学报*, 40(2): 380-395. [Song Cuiyu, Lü Dawei. 2022. Advances in time series analysis methods for Milankovitch cycles[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(2): 380-395.]
- 唐雨,张云峰,胡林辉,等. 2021. 开江—梁平海槽西侧中东段长兴组台缘储层特征及差异性[J]. *沉积学报*, 2021, 39(6): 1593-1608. [Tang Yu, Zhang Yunfeng, Hu Linhui, et al. 2021. Characteristics and differences of the platform margin reservoir, Changxing Formation, central eastern region, west of the Kaijiang-Liangping trough[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(6): 1593-1608.]
- 王良军,李红,曾韬,等. 2022. 四川盆地东部茅口组白云岩成因:来自岩石学、矿物学和地球化学的证据[J]. *古地理学报*, 24(5): 989-1016. [Wang Liangjun, Li Hong, Zeng Tao, et al. 2022. Origins of dolostones of the Maokou Formation in eastern Sichuan Basin: Evidence from lithology, mineralogy, and geochemistry[J]. *Journal of Palaeogeography*, 24(5): 989-1016.]
- 向娟,胡明毅,胡忠贵,等. 2011. 四川盆地中二叠统茅口组沉积相分析[J]. *石油地质与工程*, 25(1): 14-19. [Xiang Juan, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, et al. 2011. Sedimentary facies analysis of Maokou Formation of Middle Permian in Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 25(1): 14-19.]
- 许国明,谢刚平,隆轲,等. 2015. 四川盆地西南部中二叠统沉积特征与勘探目标[J]. *天然气工业*, 35(7): 27-33. [Xu Guoming, Xie Gangping, Long Ke, et al. 2015. Sedimentary features and exploration targets of Middle Permian reservoirs in the southwestern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 35(7): 27-33.]
- 薛武强,刘喜停,颜佳新,等. 2015. 重庆南川地区中二叠统茅口组眼球状灰岩成因[J]. *地质科学*, 50(3): 1001-1013. [Xue Wuqiang, Liu Xiting, Yan Jiaxin, et al. 2015. The origin of eyeball-shaped limestone from Maokou Formation (Mid-Permian) in Nanchuan region, Chongqing, Southwest China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 50(3): 1001-1013.]
- 于春勇,崔军平,王起琮,等. 2020. 鄂尔多斯盆地南部奥陶系马家沟组中下组合白云岩稀土元素特征及其成因[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 50(5): 819-830. [Yu Chunyong, Cui Junping, Wang Qicong, et al. 2020. The REE characteristics and genesis of the middle and lower combinations dolomite of Ordovician Majiagou in the southern Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 50(5): 819-830.]
- 张宝民,单秀琴,张静,等. 2017. 中国海相碳酸盐岩储层地质与成因[M]. 北京:科学出版社: 1-617. [Zhang Baomin, Shan Xiuqin, Zhang Jing, et al. 2017. *Geology and genesis of marine carbonate reservoirs in China*[M]. Beijing: Science Press: 1-617.]
- 张涛,苏玉山,余刚,等. 2015. 热液白云岩发育模式:以扎格罗斯盆地白垩系A油田为例[J]. *石油与天然气地质*, 36(3): 393-401. [Zhang Tao, Su Yushan, She Gang, et al. 2015. A study on the genetic model of hydrothermal dolomitization in Taq Taq oilfield, Kurdistan region, Iraq—taking oilfield A in the Cretaceous in Zagros Basin as an example[J]. *Oil & Gas Geology*, 36(3): 393-401.]
- 张玺华,陈聪,黄婕,等. 2019. 四川盆地中二叠世广元—巴中拉张槽的发现及其油气地质意义[J]. *中国石油勘探*, 24(4): 466-475. [Zhang Xihua, Chen Cong, Huang Jie, et al. 2019. The discovery of Middle Permian Guangyuan-Bazhong extensional trough in the Sichuan Basin and its petroleum geological significance[J]. *China Petroleum Exploration*, 24(4): 466-475.]
- 张玺华,陈聪,张亚,等. 2018. 川西北地区茅口组海槽相地质特征及其油气地质意义[J]. *天然气勘探与开发*, 41(3): 42-50. [Zhang Xihua, Chen Cong, Zhang Ya, et al. 2018. Geological characteristics of trough facies, Maokou Formation, northwestern Sichuan Basin: Implications for geology[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 41(3): 42-50.]
- Bau M. 1996. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(3): 323-333.
- Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181-193.
- Burke W H, Denison R E, Hetherington E A, et al. 1982. Variation of seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ throughout Phanerozoic time[J]. *Geology*, 10(10): 516-519.
- Douville E, Bienvenu P, Charlou J L, et al. 1999. Yttrium and rare earth elements in fluids from various deep-sea hydrothermal systems[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(5): 627-643.
- Frimmel H E. 2009. Trace element distribution in Neoproterozoic carbonates as palaeoenvironmental indicator[J]. *Chemical Geology*, 258(3/4): 338-353.

- Gomes J M P, Rios-Netto A M, Borghi L, et al. 2021. Cyclostratigraphic analysis of the Early Cretaceous laminated limestones of the Araripe Basin, NE Brazil: Estimating sedimentary depositional rates[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 112: 103563.
- Hallam A. 1986. Origin of minor limestone-shale cycles: Climatically induced or diagenetic?[J]. *Geology*, 14(7): 609-612.
- Hu Z W, Huang S J, Li Z M, et al. 2013. Geochemical characteristics of the Permian Changxing Formation reef dolomites, northeastern Sichuan Basin, China[J]. *Petroleum Science*, 10(1): 38-49.
- Kakuwa Y, Matsumoto R. 2006. Cerium negative anomaly just before the Permian and Triassic boundary event—the upward expansion of anoxia in the water column[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 229(4): 335-344.
- Li J, Cai Z X, Chen H R, et al. 2018. Influence of differential diagenesis on primary depositional signals in limestone-marl alternations: An example from Middle Permian marine successions, South China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 495: 139-151.
- Luan G Q, Azmy K, Berra F, et al. 2022. Origin of dolomites in oolitic carbonates of the Middle Jurassic Dorgali Formation, eastern Sardinia, Italy: Petrographic and geochemical constraints[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 135: 105395.
- Munnecke A, Westphal H. 2004. Shallow-water aragonite recorded in bundles of limestone-marl alternations—the Upper Jurassic of SW Germany[J]. *Sedimentary Geology*, 164(3/4): 191-202.
- Pang Q, Hu G, Zhang X H, et al. 2021. Organic geochemistry, sedimentary environment, and organic matter enrichment of limestone-marlstone rhythms in the Middle Permian northern Sichuan Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 134: 105306.
- Raiswell R. 1988. Chemical model for the origin of minor limestone-shale cycles by anaerobic methane oxidation[J]. *Geology*, 16(7): 641-644.
- Shi J Y, Jin Z J, Liu Q Y, et al. 2021. Sunspot cycles recorded in Eocene lacustrine fine-grained sedimentary rocks in the Bohai Bay Basin, eastern China[J]. *Global and Planetary Change*, 205: 103614.
- Vasconcelos C, Mckenzie J A. 1997. Microbial mediation of modern dolomite precipitation and diagenesis under anoxic conditions (Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro, Brazil)[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 67(3): 378-390.
- Veizer J. 1983. Chemical diagenesis of carbonates: Theory and application of trace element technique[M]//Arthur M A, Anderson T F, Kaplan I R, et al. *Stable isotopes in sedimentary geology*. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology: 1-100.
- Veizer J, Ala D, Azmy K, et al. 1999. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater[J]. *Chemical Geology*, 161(1/2/3): 59-88.
- Warren J. 2000. Dolomite: Occurrence, evolution and economically important associations[J]. *Earth-Science Reviews*, 52(1/2/3): 1-81.
- Westphal H. 2006. Limestone-marl alternations as environmental archives and the role of early diagenesis: A critical review[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 95(6): 947-961.

Dolomitic Process in the First Member of the Maokou Formation, Southern Sichuan Basin, and Its Indication for the Formation of the Eyeball-Shaped Limestone: A case of well DB1

TIAN Chen^{1,2}, HU Guang^{1,2}, XU ZhengYu³, PANG Qian^{1,2}, LIU RenPing^{1,2}, LIU PeiYun^{1,2}, LIU YiDong^{1,2}

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2. PetroChina Key Laboratory of Carbonate Reservoir, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

3. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310023, China

Abstract: [Objective] Limestone-marlstone alterations (LMAs) are important archives of climatic, hydrological, and geological events. However, as a typical endmember of the LMAs, knowledge regarding the genesis of the LMAs with eyelid-eyeball structure from First member of the Maokou Formation in the Sichuan Basin is not widely accepted. This not only seriously affects environmental research of the LMAs with eyelid-eyeball structure, but also affects the efficiency of its exploration. Dolomitization is developed in the LMAs with eyelid-eyeball structure (mainly in the eye-

Foundation: Science and Technology Cooperation Project of the CNPCSWPU Innovation Alliance, No. 2020CX010302

Corresponding author: HU Guang, E-mail: 201499010113@swpu.edu.cn

lids) of First member of the Maokou Formation of well DB1 during the penecontemporaneous and early diagenetic phase can be used to constrain the depositional environments of carbonate rocks. [Methods] Petrological and geochemical analyses have been conducted in detail, the process and the fluid properties of dolomitization has been discussed to constrain the process of LMAs with eyelid-eyeball structure. [Results] Three types of dolomitization developed in First member of the Maokou Formation, which are muddy dolomitic (EDM-I); limy dolomitic (EDM-II); and dolomitic marlstone (EDL). EDM-I has the highest degree of dolomitization, distinct bands of cathodoluminescence, a flat rare earth partitioning pattern, higher $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values, but lower Y/Ho values relative to seawater; it was dolomitized by penecontemporaneous seawater mixed with a small amount of meteoric freshwater during the penecontemporaneous phase. EDM-II has a middle degree of dolomitization, a left leaning rare earth partitioning pattern, and values of $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, and Y/Ho similar to seawater; it was dolomitized by seawater with high Mg/Ca, which was induced by frequent sea-level rise and fall changes during the syn-sedimentary and penecontemporaneous phase. EDL has the lowest degree of dolomitization, a left leaning rare earth partitioning pattern, higher $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values relative to EDM-II, and seawater-like Y/Ho values. EDL was dolomitized by the sealed seawater of the syn-sedimentary phase that has been altered with the wall rocks in the early diagenetic stage. [Conclusions] The dolomitization of the LMAs with eyelid-eyeball structure by weakly evaporating seawater and seawater mixed with freshwater during the penecontemporaneous and early diagenetic phase requires that the LMAs deposited in a shallower water. The high mud content, high strontium isotope and rare earth element values, low carbon and oxygen isotope values, and Y/Ho values of the eyelid-like marlstone relative to the eyeball-like limestone indicate that the depth of water for the eyelid-like marlstone is shallower than that of the eyeball-like limestone during deposition. Therefore, the LMAs in First member of the Maokou Formation were produced under cyclic oscillation in the depositional environment, and their genesis may have been mainly influenced by sedimentary process.

Key words: southern Sichuan Basin; the First member of the Maokou Formation; eyeball-shaped limestone; sedimentary process; dolomitic genesis