

川东北元坝地区长兴组生物礁白云岩成因机理

徐守成¹,李国蓉²,张小青¹,吴亚军¹,景小燕¹,刘远洋¹

(1. 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院,四川成都610041;

2. 成都理工大学,油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川成都610059)

摘要:上二叠统长兴组白云岩为川东北元坝气田生物礁气藏主要储层岩石类型。长兴组生物礁白云岩储层形成主要由白云石化作用和溶蚀作用影响控制。为了揭示生物礁白云岩成因机理,通过长兴组岩心观察、白云岩岩相学特征分析与地球化学特征分析方法结合,对白云岩的不同白云石类型及特征进行了深入研究,明确了白云岩储层的白云石化作用类型和期次。长兴组生物礁白云岩储层白云石化类型可划分为4类,主要为同生期高盐度条件蒸发白云石化作用及回流渗透白云石化作用、浅埋藏白云石化作用、早成岩期热液白云石化作用,这3期白云石化作用控制了元坝地区长兴组生物礁白云岩储层质量和分布。

关键词:白云石化作用;成因机理;生物礁白云岩;长兴组;元坝地区;四川盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Genetic mechanism of reefal dolostones of the Changxing Formation in Yuanba area, northeastern Sichuan Basin

Xu Shoucheng¹, Li Guorong², Zhang Xiaoqing¹, Wu Yajun¹, Jing Xiaoyan¹, Liu Yuanyang¹

(1. Exploration and Production Research Institute, Southwest Oil and Gas Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Dolostones of the Upper Permian Changxing Formation are the major reservoir rock type of the bioherm gas pool in Yuanba area, Northeastern Sichuan Basin. The formation of the reefal dolostone reservoir in the Changxing Formation is principally influenced by both dolomitization and dissolution. In order to reveal the genetic mechanism of bioherm dolostone, core observation, petrographic and geochemical analyses were integrated to study different types of dolomites and their characteristics of the Changxing Formation dolostone and determine the types and stages of dolomitization of the dolostone reservoir. Four types of dolomitization were identified, including syngenetic evaporative dolomitization and seepage-reflux dolomitization under high salinity, shallow burial dolomitization and hydrothermal dolomitization of early diagenesis. The three stages of dolomitization control the quality and distribution of the reefal dolostone reservoirs of the Changxing Formation in Yuanba area.

Key words: dolomitization, genetic mechanism, reefal dolostone, Changxing Formation, Yuanba area, Sichuan Basin

川东北元坝地区长兴组台缘生物礁勘探开发取得了重大突破,提交天然气探明储量 $1\,943.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,对元坝气田全面评价与产能建设,并建成了国内首个超深生物礁大气田。对于本地区长兴组气藏白云岩储层成因机制,存在不同的认识,主要涉及白云石化作用和溶蚀作用两个方面。在白云石化成因研究方面,国内一些学者提出了一系列不同的白云石化模式。如蒸

发白云石化和卤水渗透回流白云石化^[1]、混合水白云石化、埋藏白云石化^[2]等和正常海水白云石化模式^[3],这些前期研究成果极大地促进了对元坝地区白云岩成因机理的认识,但是也存在一些异议。随着元坝地区长兴组气藏开发的全面展开,需要对生物礁白云岩的白云石化成因期次及模式进行深入总结归纳,以便为长兴组气藏的高效开发提供地质理论和实际指导。

收稿日期:2017-02-10;修订日期:2017-07-10。

第一作者简介:徐守成(1982—),男,硕士、工程师,碳酸盐岩储层地质学。E-mail: xushoucheng2@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05017-005)。

本文充分利用元坝地区长兴组生物礁带上15口钻井的岩心和岩屑资料,利用白云岩岩相学特征与地球化学特征分析,对区内长兴组白云岩的白云石类型及特征进行了深入研究,进一步明确了长兴组生物礁白云岩的白云石化作用类型和期次,探讨了生物礁白云岩成因机理,尤其首次发现并提出本地区的早成岩期热液白云石化作用,是对元坝地区长兴组白云岩成因类型的重要补充。

1 地质背景

元坝气田构造位置位于四川盆地川北坳陷与川中低缓构造带结合部,西北与九龙山背斜构造带相接,东北与通南巴构造带相邻,南部与川中低缓构造带相连。整体具有埋藏超深、构造较平缓、断裂欠发育的特征(图1)。

晚二叠世长兴期,元坝地区位于上扬子地台,上扬子地台处于古特斯洋东缘,具有发育生物礁的优越古地理环境。目前,二叠系长兴组生物礁主要分布于川东北开江-梁平海槽西缘,普光地区位于其东缘。长兴早期为缓坡型碳酸盐台地沉积,晚期为台地边缘生物礁滩沉积,在开阔台地内发育点礁和台内滩沉积,有利沉积相为台缘生物礁相,呈条带状

分布于北部地区。礁相储层发育于礁顶(盖)和礁后,礁前相对较差^[4]。储层整体表现为“纵向不同类型储层不等厚互层、横向连通性差、平面厚度变化大”的强非均质性特点^[5]。

2 生物礁白云岩岩相学特征

储层岩石类型有(溶孔)残余生屑晶粒白云岩、(溶孔)晶粒白云岩、(溶孔)藻粘结微粉晶白云岩、生物礁白云岩、灰质白云岩。储层储集空间类型主要为晶间孔和晶间溶孔,其次为不规则溶孔及溶洞,少量粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔、微裂缝。储层总体属于低孔、中低渗储层,平均孔隙度为4.87%,平均渗透率 $0.51 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。具有中排驱压力和孔喉分选差的特征,孔喉组合主要为中孔细喉型,残余生屑白云岩和晶粒白云岩孔隙结构好。

白云石化作用是元坝长兴组储层形成的基础,不同白云石化作用类型的表现形式就是不同的白云石类型,通过对不同白云石类型特征分析,认为区内长兴组除了发育同生期高盐度条件下的微晶白云石、粉-细晶白云石,浅埋藏成因的粉-细晶自形白云石外,还存在一期早成岩期热液白云石化作用形成的白云石,该期热液白云石分为3种形式,分别是粉-细晶脏白云

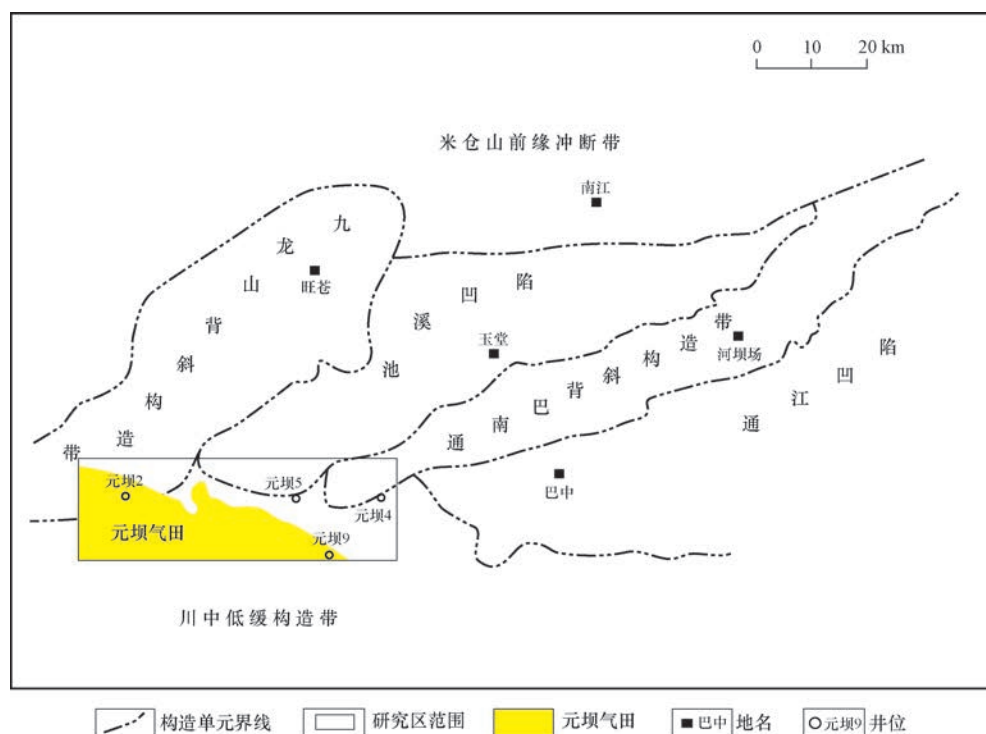


图1 川东北元坝地区构造位置

Fig. 1 Structural location of Yuanba area, northeastern Sichuan Basin

石、中粗晶脏白云石和鞍状白云石。

2.1 微晶白云石

白云石晶体细小,表面脏,结构较为均一,局部可见盐膏假晶形态,晶间孔不发育,岩石相对致密;可见岩石整体由微晶白云石组成构成微晶云岩、藻粘结云岩、颗粒云岩,也可见微晶白云石在岩石中呈斑状富集

形成微晶白云石条带或斑块(图 2a,b)。此类白云石仅交代改造微晶灰泥、生屑颗粒、藻粘结微晶、生物礁骨架等沉积组分。

该类白云石在阴极射线发光颜色为弱暗红色光(图 2c,d),电子探针分析:MnO 为 0.01%,Na₂O 为 0.07%,MgO 为 19.36%,CaO 为 33.85%。为同生期高盐度条件下蒸发白云石化作用形成^[6-8]。

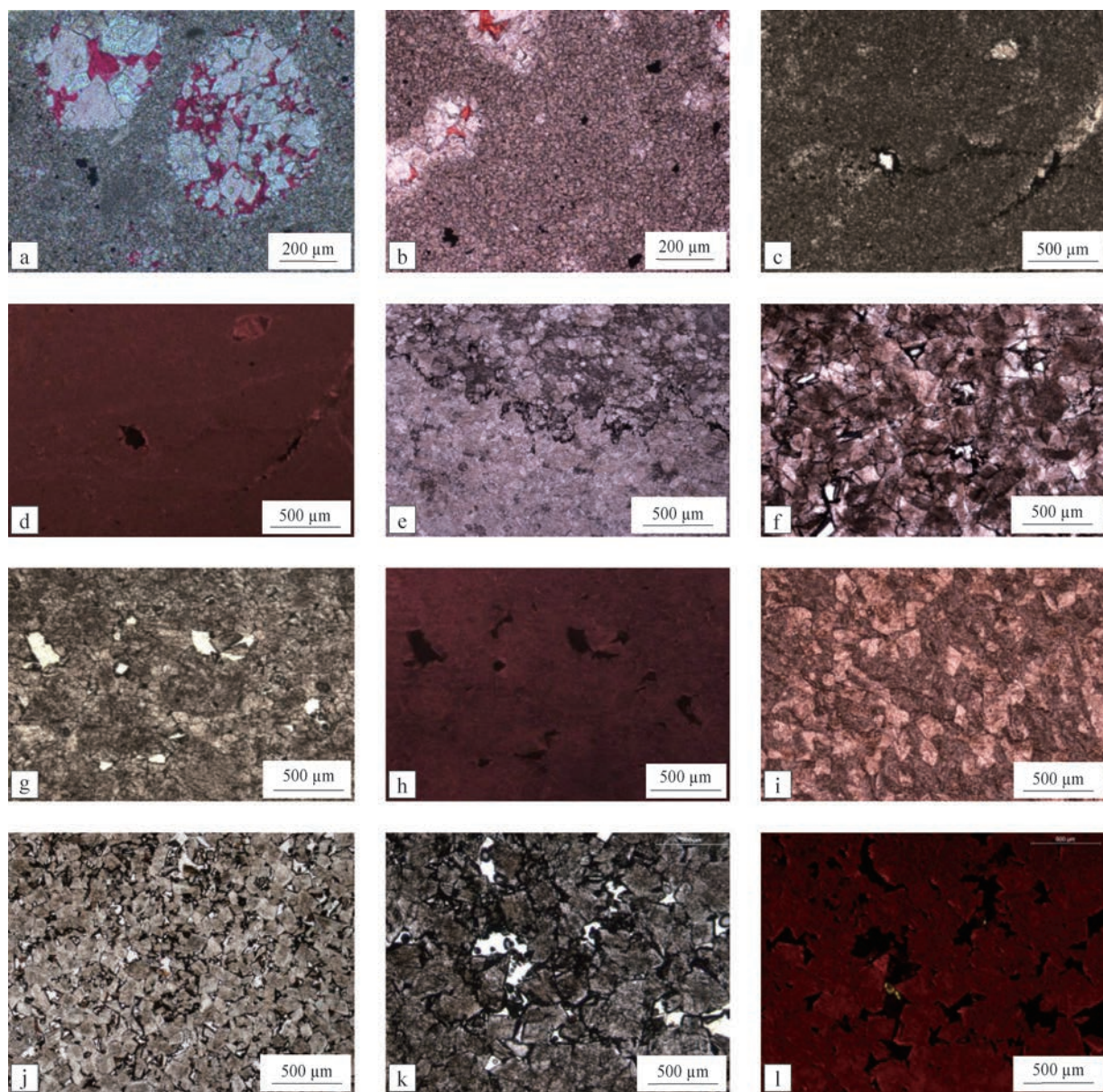


图2 元坝地区长兴组不同类型白云石岩相学特征

Fig. 2 Petrographic characteristics of different types of dolomites in the Changxing Formation, Yuanba area

a. 微晶白云石,可见盐膏假晶,元坝 103H 井,埋深 6 790 m,单偏光;b. 微晶白云石呈斑块状分布,元坝 271 井,埋深 6 336 m,单偏光;c. 微晶白云石均匀分布,元坝 271 井,埋深 6 325.60 m,单偏光;d. 微晶白云石阴极发光呈弱暗红色,元坝 271 井,埋深 6 325.60 m,阴极发光;e. 粉晶它形白云石呈斑状分布,元坝 104 井,埋深 6 705.50 m,单偏光;f. 细晶它形脏白云石呈,元坝 27 井,埋深 6 294.41 m,单偏光;g. 粉-细晶它形白云石,元坝 28 井,埋深 6 803.44 m,单偏光;h. 粉-细晶它形白云石阴极发光呈暗红色光,元坝 28 井,埋深 6 803.44 m,阴极发光;i. 分散状粉-细晶自形白云石,元坝 11 井,埋深 6 774.03 m,单偏光;j. 粉细晶自形白云石,元坝 104 井,埋深 6 708.94 m,单偏光;k. 细晶自形白云石,少量半自形,元坝 29 井,埋深 6 642.50 m,单偏光;l. 细晶自形白云石阴极发光呈暗玫瑰红色,局部晶体边缘为亮红色光环边,元坝 29 井,埋深 6 642.50 m,阴极发光

2.2 粉-细晶它形白云石

此类白云石主要呈条带或斑状分布、以及构成白云岩;白云石晶体从粉晶到细晶,晶体自形程度普遍较差,呈它形晶,晶体表面普遍较脏,个别保留了原来颗粒结构的阴影,晶体之间为镶嵌状接触(图2e,f)。此类白云石仅交代微晶灰泥、生屑颗粒、藻粘结微晶、生物礁骨架等沉积组分。

该类白云石的阴极发光特征与微晶白云石相近,发暗红色光(图2g,h),电子探针分析:MnO为0.01%,Na₂O为0.06%,MgO为20.66%,CaO为31.64%。为同生期高盐度条件回流渗透白云石化作用形成^[5-8]。

2.3 粉-细晶自形白云石

此类白云石在区内长兴组碳酸盐岩中最为常见,其在岩石中可呈整体云化、斑状分布、分散状分布、偶见分布等4种产状形式存在,分散状分布、斑状分布是此类白云石在岩石中的主要产出形式(图2i),部分层段以整体云化形式产出(图2j);白云石多呈自形晶,部分为半自形晶,多为粉-细晶级,常见晶间孔和晶间溶孔发育,部分孔洞中可见灰质和沥青等残余;白云石可交代微晶灰泥、生屑颗粒、藻粘结微晶等沉积组分和生屑粒间胶结物。

该类白云石阴极发光呈现出暗玫瑰红色的特征,局部晶体边缘为亮红色光的环边,可能是受到热液作用改造而形成(图2k,l)。电子探针分析:MnO为0.05%,Na₂O为0.02%,MgO为23.78%,CaO为32.09%。为浅埋藏白云石作用形成^[5-8]。

2.4 热液白云石

此类白云石在区内长兴组碳酸盐岩常见,具体表现为:生物礁灰岩骨架间孔洞海底胶结物末端热液白云石的沉淀和交代(图3a,d)、溶蚀孔洞边缘热液白云石的生长、不规则热液白云石斑块的发育(图3b)、生物体腔内的交代等(图3c)。从晶体特征上表现为3种细晶类型,第一类是粉-细晶白云石,与前述粉-细晶它形白云石明显不同,晶形怪异,局部具弧形晶面,表面较脏,实为晶体较细小的鞍状白云石^[9];第二类是中-粗晶白云石,晶体大小集中在0.25 mm到1 mm之间,晶形较差,多呈它形,局部呈自形-半自形,表面较脏,正交偏光下具弱波状消光特征(图3e);第三类是典型的鞍状白云石,晶体较粗大,可达中-粗-巨晶,晶面弯曲或弧形特征清楚,正交偏光下波状消光特征典型^[10](图3f)。

该类白云石阴极射线发光特征明显有别于前面所述的3类白云石,前3类白云石发光暗,此类白云石均发光强,呈桔红色-亮桔红色光(图4a-h)。

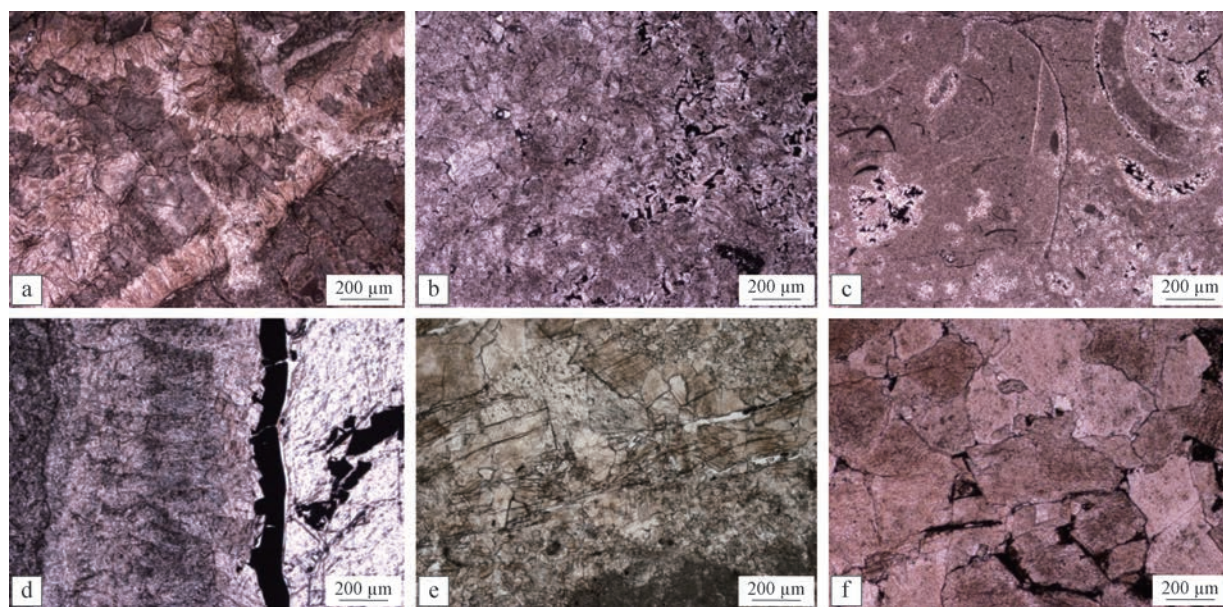


图3 元坝地区长兴组热液成因白云石的微观岩石学特征

Fig. 3 Microscopic petrologic characteristics of hydrothermal dolomites in the Changxing Formation, Yuanba area

a. 生物礁灰岩骨架间孔洞海底胶结物末端热液白云石,元坝107井,埋深6 624.20 m,单偏光;b. 不规则热液白云石斑块,元坝28井,埋深6 806.48 m,单偏光;c. 生物体腔内的交代粉晶白云石,元坝271井,埋深6 325.60 m,单偏光;d. 海底胶结物末端热液白云石,元坝102井,埋深6 776.69 m,单偏光;e. 它形中-粗晶白云石,元坝22井,埋深6 566.97 m,单偏光;f. 鞍状白云石,可达中-粗-巨晶,晶面弯曲或弧形特征清楚,元坝271井,埋深6 434 m,单偏光。

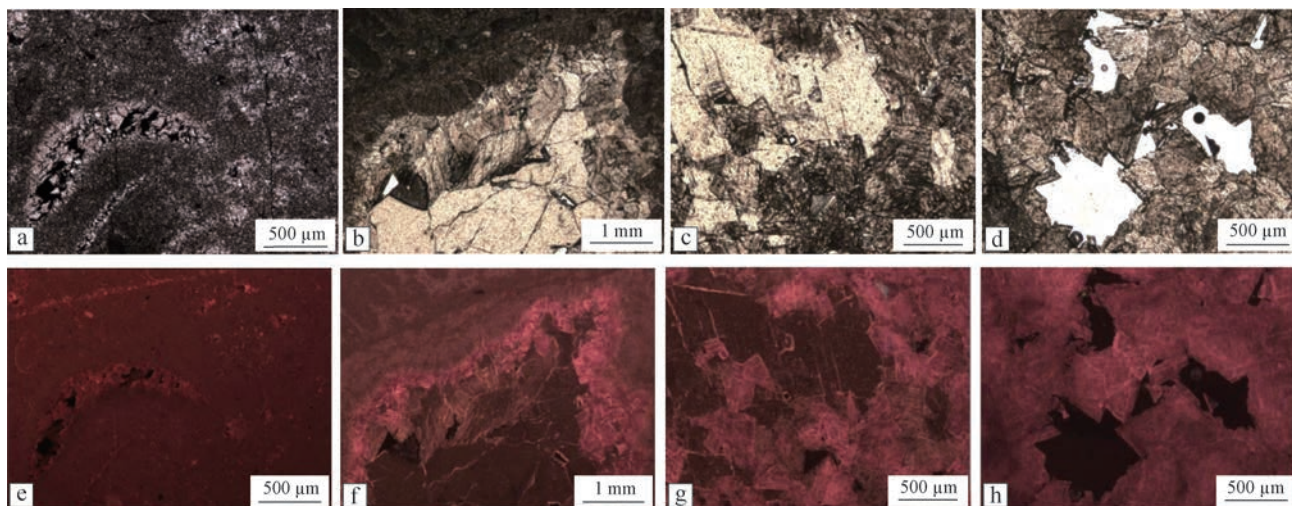


图4 元坝地区长兴组热液成因白云石的阴极发光特征

Fig. 4 Cathodoluminescence characteristics of hydrothermal dolomites in the Changxing Formation, Yuanba area

a, e. 生物体腔内的交代粉晶白云石阴极发光呈亮桔红色,元坝271井,埋深6 325.60 m, a为单偏光, e为阴极发光; b, f. 溶蚀孔洞边缘热液白云石的阴极发光呈亮桔红色,方解石充填孔隙,不发光,元坝10井,埋深7 026.20.60 m, b为单偏光, f为阴极发光; c, g. 溶蚀孔洞边缘热液白云石的阴极发光呈亮桔红色,元坝123井,埋深6 997.46 m, c为单偏光, g为阴极发光; d, h. 它形一半自形中晶脏白云石的阴极发光呈亮桔红色,元坝102井,埋深6 724.55 m, d为单偏光, h为阴极发光。

根据此类白云石其后受到第二期溶蚀作用(与有机酸性水有关的溶蚀作用)的改造,形成于液态石油充注之前,此期成岩作用属于早成岩期的成岩作用。结合此期热液白云石与川西北地区中二叠统内部受峨眉地裂运动影响的热液白云石的阴极发光特征具有相似性,可以认为长兴组热液白云石形成可能与受峨眉地裂运动影响的岩浆期后热液作用有关^[11]。

3 生物礁白云岩地球化学特征

3.1 白云石的有序度特征

白云石的有序度是反映白云石晶格中 Mg^{2+} , Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 的排列有序大小,用其(015)和(110)两个晶面衍射峰的峰强度比 $I_{(015)}/I_{(110)}$ 来表征的,比值越接近于1,表明有序度越高。一般在地表或近地表蒸发环境中,强烈的蒸发导致具有高 Mg^{2+}/Ca^{2+} 值的超浓缩孔隙流体在高盐度和较高温度条件下迫使白云石快速结晶,从而造成 Mg^{2+} , Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 来不及作有序排列而使形成的白云石有序度较低。相反,在埋藏条件下,由于镁离子的供给不充分,导致白云石结晶缓慢,有充足的时间形成有序的白云石晶格,有序度就高。

本次研究分未受热液改造的白云石(微晶白云石、粉-细晶他形脏白云石、粉-细晶自形白云石)以及热液成因及改造的白云石(粉-细晶白云石、中-粗晶白

云石)等5种类型,作出白云石X-衍射有序度分布特征图(图5)。

微晶白云石有序度值为0.54~0.58,平均值为0.56,揭示其形成于蒸发环境,有序度低。粉-细晶它形脏白云石有序度低,为0.56~0.75,其平均值为0.64,表征其成岩环境与微晶白云石相似,仍是高盐度环境条件下快速白云化作用的产物。未受热液改造的粉-细晶级自形白云石有序度相对较高,在0.70~1.00变化,平均值为0.852,为浅埋藏成岩环境。

热液改造的粉-细晶白云石有序度相对于未受热

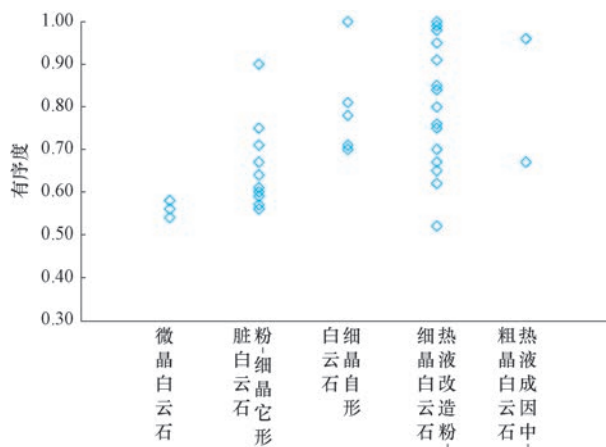


图5 元坝地区长兴组不同类型白云石有序度分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of order degree of different dolomites in the Changxing Formation, Yuanba area

液改造的粉-细晶它形和自形白云石有所升高,变化范围大,其可在 0.61 ~ 0.99 内变化,平均值为 0.78。热液成因的中粗晶白云石,有序度较高,介于 0.67 ~ 0.96,平均值为 0.82;这与广元西北乡剖面中二叠统典型热液成因的中-粗晶白云石及鞍状白云石的有序度极其相似,后者有序度在 0.68 ~ 0.90 内变化,平均值为 0.80^[12]。分析认为在热液作用过程中,白云石形成或先成的白云石重结晶改造,白云石结晶温度较高,但 Mg^{2+} 供给不充分,结晶速度慢,故形成较高有序度的白云石。热液作用有助于提高白云石的有序度。

3.2 白云石的碳、氧同位素组成特征

本次根据不同的白云石成因类型选送元坝长兴组白云岩全岩碳氧同位素分析 40 个样品,激光碳氧同位素分析 5 个样品。

微晶白云石 $\delta^{13}C$ (PDB) 为 1.56‰ ~ 2.32‰,平均值为 2.05‰, $\delta^{18}O$ (PDB) 值为 -3.32‰ ~ -3.87‰,平均值为 -3.61‰;粉-细晶它形脏白云石 $\delta^{13}C$ (PDB) 为 2.07‰ ~ 5.56‰,平均值为 4.17‰, $\delta^{18}O$ (PDB) 值为 -4.67‰ ~ -5.85‰,平均值为 -5.29‰ (图 6)。微晶白云石和粉-细晶它形脏白云石的 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 值与长兴期正常海水相近, $\delta^{13}C$ (PDB) 为 2.52‰ ~ 4.11‰,平均值为 3.22‰; $\delta^{18}O$ (PDB) 值为 -4.23‰ ~ -6.98‰,平均值为 -5.74‰ (图 6)^[13-14]。表明白云石化流体为海水蒸发浓缩形成的高盐度水体,微晶白云石受微生物作用影响呈现 $\delta^{13}C$ 值偏

轻^[14-15]。

未受到热液改造或热液改造较弱的粉-细晶自形白云石的分析结果,其 $\delta^{13}C$ (PDB) 值在 3.64‰ ~ 4.82‰,平均值为 4.23‰,明显较前述微晶白云石的 $\delta^{13}C$ 值高,与粉-细晶它形脏白云石大体相当; $\delta^{18}O$ (PDB) 值为 -5.17‰ ~ -5.80‰,平均值为 -5.49‰ (图 6),相对于前述粉-细晶它形脏白云石进一步有所降低,但降低幅度较小,揭示了白云石化流体为封存的高盐度海水, $\delta^{18}O$ 值降低与温度升高有关,但由于其 $\delta^{18}O$ 值相对于粉-细晶它形脏白云石没有较大幅度的降低,揭示了它们在埋藏深度和埋藏温度上没有大的变化,由粉-细晶它形脏白云石-粉-细晶自形白云石,可能是一个连续白云石化作用的过程 (图 7),与普光地区长兴组白云岩的成因一致。与普光地区长兴组白云岩的碳氧稳定同位素组成具有较好的相似性,后者 $\delta^{13}C$ (PDB) 值在 1.70‰ ~ 3.00‰ 范围,平均值为 2.45‰, $\delta^{18}O$ (PDB) 值为 -3.60‰ ~ -5.60‰,平均值为 -5.00‰^[16]。

受热液改造的粉-细晶白云石 $\delta^{13}C$ (PDB) 值为 2.87‰ ~ 5.04‰,平均值为 4.30‰, $\delta^{18}O$ (PDB) 值为 -4.75‰ ~ -7.27‰,平均值为 -5.40‰,与粉-细晶它形脏白云石和粉-细晶自形白云石碳氧同位素非常相似,具有大范围重叠 (图 7),表明先成的不同类型白云石发生程度不一的热液重结晶作用,并继承了改造前白云石的碳氧同位素特征。

中-粗晶白云石 $\delta^{13}C$ (PDB) 值为 2.03‰ ~ 3.08‰,平均值为 2.69‰; $\delta^{18}O$ (PDB) 值为 -5.15‰ ~

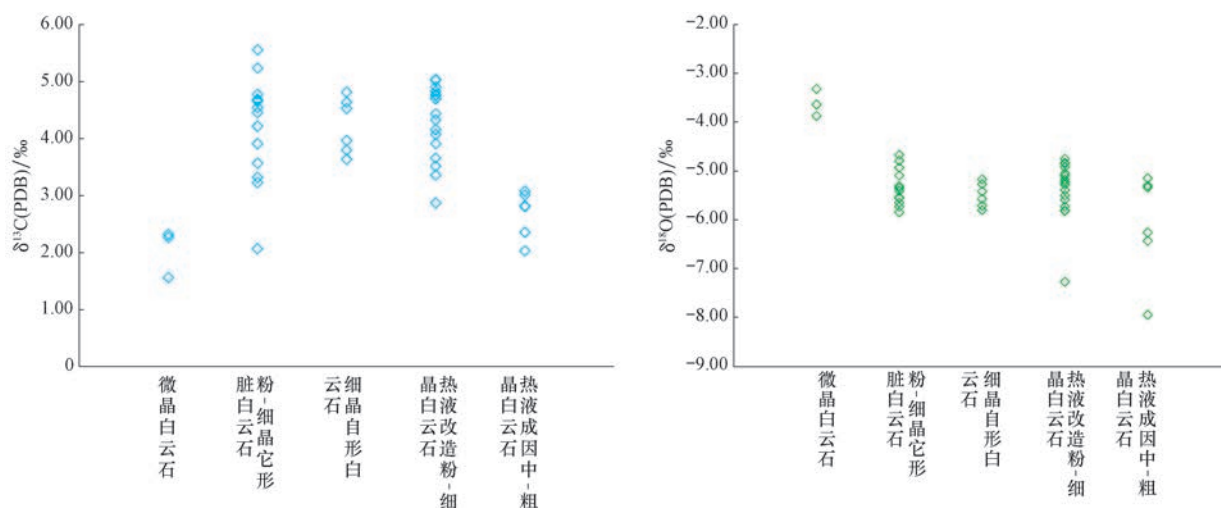


图6 元坝地区长兴组不同类型白云石碳、氧同位素特征

Fig. 6 Carbon and oxygen isotope characteristics of different dolomites in the Changxing Formation, Yuanba area

a. 不同类型白云石碳同位素特征; b. 不同类型白云石氧同位素特征

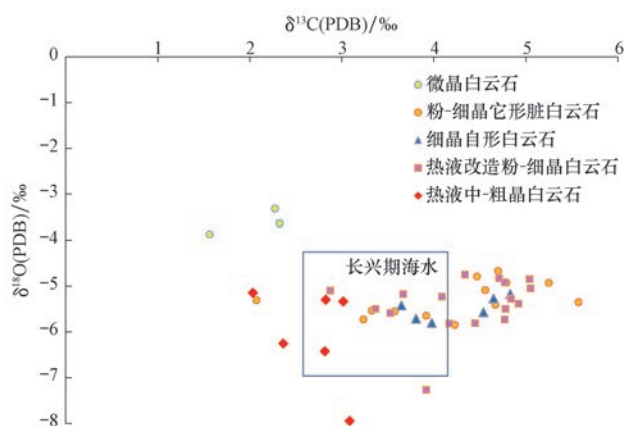


图7 元坝地区长兴组不同类型白云石碳-氧同位素交会图

Fig. 7 $\delta^{13}\text{C}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ cross-plot for different dolomites in the Changxing Formation, Yuanba area

-7.95‰, 平均值为 -6.07‰。相对上述各类型白云石(微晶白云石除外)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈明显偏轻趋势, 同时 $\delta^{18}\text{O}$ 值亦呈偏轻趋势(图6, 图7)。与川北广元西北乡中二叠统碳酸盐岩中的中-粗晶白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化特征具有相似性, 中-粗晶白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB) 值在 -6.09‰ ~ -7.09‰, 平均值为 -6.51‰。结合中-粗晶白云石包裹体均一法温度测定结果, 对区内长兴组中-粗晶白云石的成岩流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值进行了恢复, 白云石化流体的 $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW) 值为 11.00‰ ~ 13.00‰, 与广元西北乡中二叠统中-粗晶白云石的成岩流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相近(图8), 指明这种热液白云石化流体是与二叠纪峨眉地裂运动有关的岩浆期后热液流体^[12]。

热液来源的白云石化流体中的氧同位素同时受到温度和盐度的影响。热液成因白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与同期海水 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值相比, 白云石化流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 热液改造的 $\delta^{18}\text{O}$ 值和基质白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值重叠较多, 前者的包裹体温度高而且盐度高, 可能与高盐度对氧同位素热分馏的抑制有关, 尤其是在超咸卤水中, 有可能掩盖真实的热液成因信息^[12, 15, 17-18]。

3.3 白云石的稀土元素组成特征

岩石或矿物中的稀土元素组成往往是成岩流体及物质来源、形成环境的指示剂, 特别是识别热液作用的重要标志, 通常, 稀土元素 Eu 正异常、Ce 负异常指示了高温热液作用的发生^[19-20]。

本次研究通过阴极发光与稀土元素分析结果的对比分析对白云石的稀土元素组成进行归类, 进而以球粒陨石为标准对测试数据作标准化处理并绘制出不同类型白云石与微晶灰岩的稀土元素配分模式图, 同时结合 Eu、Ce 特征以及 ΣREE 值分析成岩流体和形成

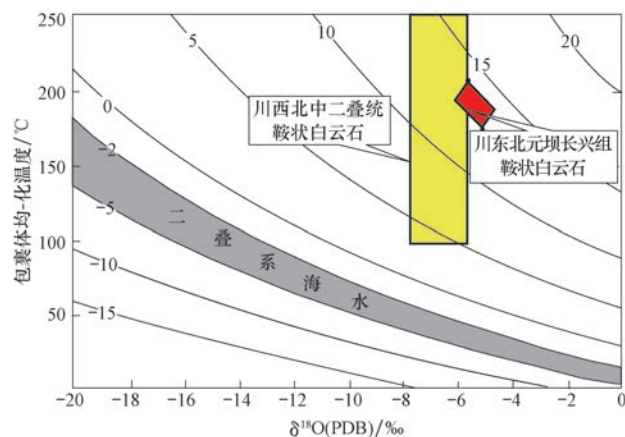


图8 元坝地区长兴组鞍状白云石的白云石化流体性质恢复

Fig. 8 Dolomitizing fluids characteristics reconstruction of saddle dolomites in the Changxing Formation, Yuanba area

环境。研究发现不同类型白云石的稀土元素组成有差异, 它们的成岩流体性质不一样。

3.3.1 微晶白云石

长兴组未受热液改造的微晶白云石与微晶灰岩稀土元素配分模式及元素组成对比(图9a), 可见此类微晶白云石与微晶灰岩 ΣREE 值较为相似, 配分模式曲线基本一致, 呈平缓型分布, LREE 相对弱富集, HREE 相对弱亏损, Ce 和 Eu 均呈负异常的特征。表征其成岩流体为正常海水或经蒸发浓缩的海水, 故而对海水稀土元素组成具有一定的继承性, 仅重稀土呈现少量亏损。

3.3.2 粉-细晶它形白云石

未受热液改造和受热液改造的粉-细晶它形白云石稀土元素组成及分配模式图(图9b, e), 该类样品中, 共有 15 个粉-细晶它形白云石, 其中 8 个样品受热液改造, 由于热液作用影响稀土元素出现差异性。未受热液改造的样品 ΣREE 值略有下降, 配分模式与正常海相微晶灰岩较为相似, LREE 弱富集, HREE 弱亏损, Ce 和 Eu 均为负异常, 表明成岩流体为正常海水或为经蒸发浓缩但较微晶白云石低的海水。受热液改造的样品 REE 特征呈现差异, 表现为 Eu 为正异常, 结合该层天青石等热液矿物的发现, 也证实了受到后期热液的改造。

3.3.3 粉-细晶自形白云石

未受热液改造和受热液改造的粉-细晶自形白云石稀土元素组成及分配模式图(图9c, f), 该类样品中, 共有 7 件自形白云石样品, 其 REE 元素组成、配

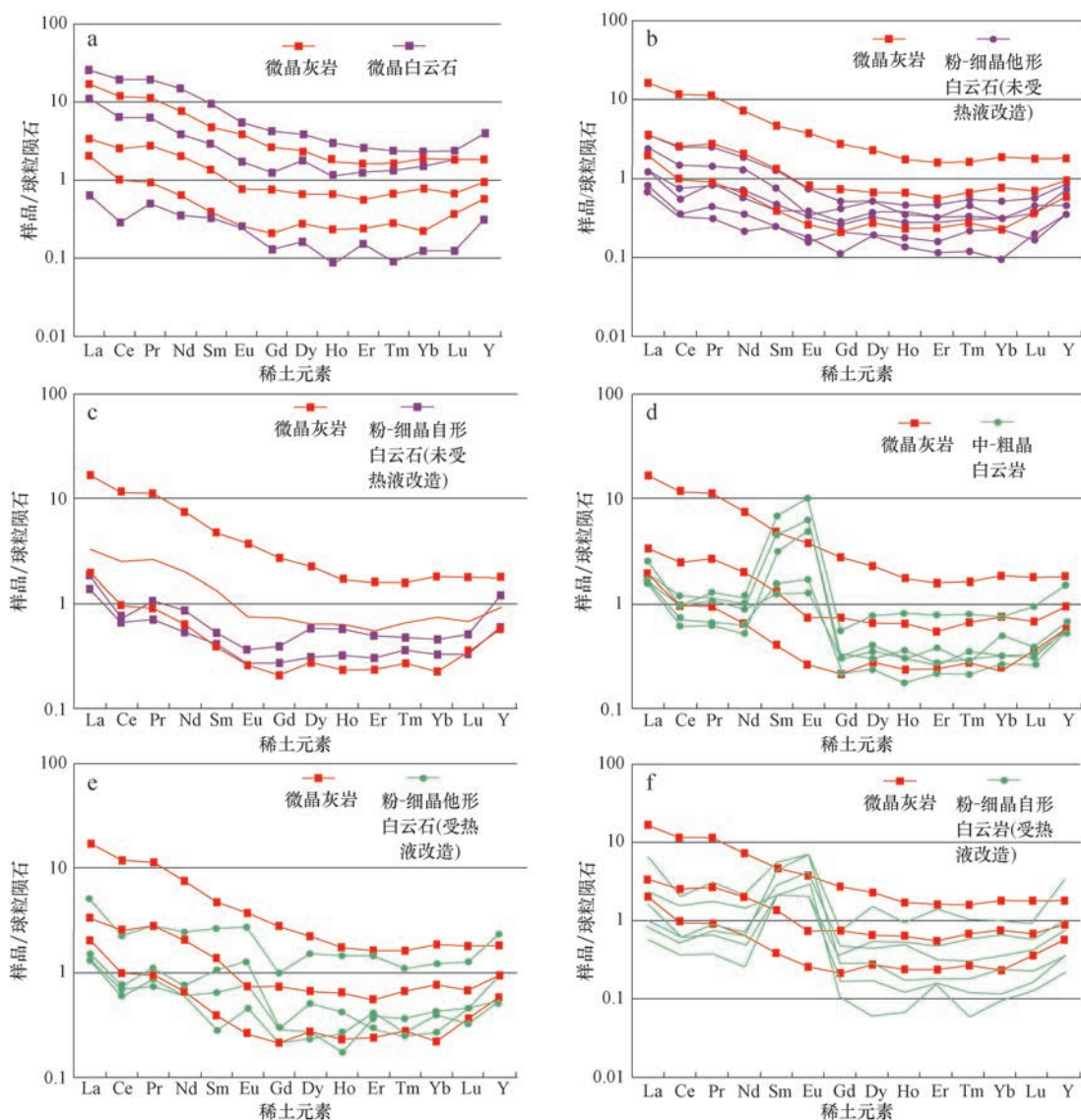


图9 元坝地区长兴组不同类型白云石稀土元素配分模式

Fig. 9 REE distributing patterns of different types of dolomites in the Changxing Formation, Yuanba area

a. 微晶白云石 (未受热液改造); b. 粉-细晶它形白云石 (未受热液改造); c. 粉-细晶自形白云石 (未受热液改造); d. 中-粗晶白云石;
e. 粉-细晶它形白云石 (受热液改造); f. 粉-细晶自形白云石 (受热液改造)

分模式及 Ce 和 Eu 异常特征亦表现为两种特征: 其中未受热液改造的 4 个白云石样品表现为与微晶灰岩相似的 LREE 弱富集, HREE 弱亏损, Ce 和 Eu 为负异常的特征, 表明成岩流体为海水或与海水相似的地层水。受到热液改造的 4 个样品配分模式曲线呈现明显的差异, 最明显的差异为 Eu 和 Sm 呈现正异常, 结合对应井段白云石阴极发光特征, 表明为热液作用改造的反映。

3.3.4 中-粗晶白云石

中粗晶白云石稀土元素组成及分配模式图 (图 9d), 本次分析的 5 件中粗晶白云石样品, 其 REE 元素组成、配分模式及 Ce、Eu 异常特征与正常海相微

晶灰岩具有明显的差异性, 微晶灰岩配分模式曲线相对更为平滑, 而中粗晶白云石 Eu 正异常明显, 揭示该类型白云石化流体为岩浆热液或岩浆期后热液。

3.4 白云石的包裹体特征

流体包裹体是在主矿物结晶生长过程中被捕获在晶体缺陷中, 立即被继续生长的主矿物所封闭的成岩流体。因此, 包裹体保存了原始成岩流体的信息和物理化学条件。流体包裹体主要被用来确定成岩古温度和成岩流体性质, 从而恢复成岩环境、分析成岩演化过程。在包裹体研究中最常用的是均一温度 (T_h) 和盐度。通过冰点温度 (T_m) 测试, 再利用 NaCl 等效溶液盐度换算公式估算成岩流体的盐度。

通过对元坝地区长兴组白云岩 10 个样品 53 个气液两相包裹体进行了均一温度(T_h)测定,以及 16 个冰点温度(T_m)测试。不同类型白云石包裹体均一温度差距较大。细晶白云石包裹体均一温度分布在 63.3 ~ 76.5 °C,而且其盐度平均 5.16%。由于二叠系海水的盐度平均值大概为 4.4% NaCl(陈轩,2012),因此可以看出该期白云石化流体为浅埋藏阶段封存的地层水,盐度值略高于同期海水,细晶白云石为浅埋藏条件下的低盐度缓慢结晶过程。热液成因白云石,包裹体均一温度变化区间在 100 ~ 140,140 ~ 200 和 220 ~ 240 °C,以 100 ~ 140 °C 范围为主(图 10a)。白云石盐度范围为:8.55% ~ 19.45%,平均 13.00%,是同期海水盐度的 3 倍。长兴期元坝地区海水温度为 35 °C,地温梯度为 317 °C/km 计算^[12],埋深 2 000 m 左右对应的温度约为 100 °C,已经处于生烃的初期阶段。而白云石与沥青的充填序列为:细晶白云石—热液成因中粗晶白云石—沥青,说明热液成因中粗晶白云石的形成时间早于油气的充注时间。故该阶段白云石化流体为地层外部的高温热液流体加入形成的超咸卤水。

广元西北乡中二叠统栖霞组白云石包裹体均一温度在 90 ~ 250 °C 范围内变化,平均值为 154 °C,主要温度区间分布在 110 ~ 190 °C。鞍状白云石具有最高的包裹体均一温度,主要在 96 ~ 250 °C 变化,平均值为 156 °C,最高可达 250 °C(图 10b),为典型受峨眉地裂运动控制与玄武岩喷发岩浆活动有关的热液成因白云石的包裹体均一温度分布特征,元坝地区长兴组热液白云石的包裹体均一法温度分布与之极其相似,可能也指明热液流体性质及来源与峨眉地裂运动控制的玄武岩喷发岩浆活动有关^[21-23]。

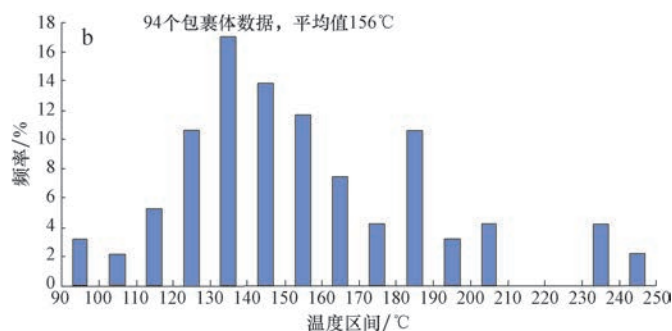
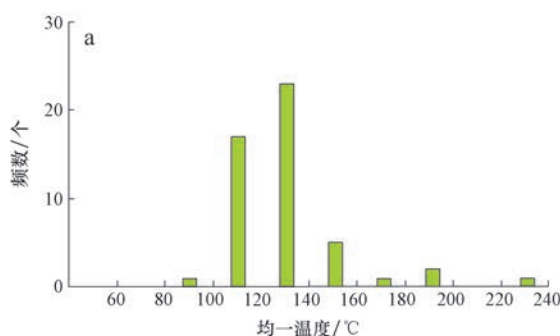


图 10 元坝地区长兴组热液成因白云石流体包裹体均一温度分布直方图

Fig. 10 Histogram showing the homogenization temperatures of fluid inclusions from hydrothermal dolomites of the Changxing Formation in Yuanba area

a. 元坝长兴组热液成因白云石; b. 广元西北乡中二叠统鞍形白云石

4 白云岩成因机理

依据前述元坝长兴组白云岩储层的白云石类型及岩相学特征认识、白云石地球化学特征与白云石化流体性质分析与恢复。结合本地区长兴组储层的沉积相特征^[24]、成藏演化史与成岩作用史^[24-25],总结出了本地区的白云岩成因机理模式,包括同生期高盐度蒸发白云石化及回流渗透白云石化作用模式、早成岩期浅埋藏白云石化模式、早成岩期热液白云石化模式。

4.1 同生期高盐度蒸发及回流渗透白云石化作用模式

晚二叠世长兴期,位于生物礁滩体、潮坪顶部的微晶白云石可与石膏、硬石膏假晶共生,其仅交代原始沉积组分,并且可被后期成岩作用改造,此时成岩流体盐度较高, Mg^{2+} 供给充分,白云石化流体为浓缩海水,揭示沉积环境为蒸发环境,可定为同生期蒸发泵白云石化的产物,由蒸发作用驱动形成毛细管作用带,导致海水不断地向上运动,被吸至沉积物内,产生毛细管蒸发作用,先期沉积的未经压实的细粒方解石,后期经浓缩的海水改造为白云石,模式图见图 11。

粉—细晶它形白云石交代特征与微晶白云石相似,在礁滩体、潮坪、滩间(礁间)均可发育,分析认为该类白云石为同生期渗透回流的产物,由于与海水的连通性不好,在蒸发作用下形成高盐度水体,富 Mg^{2+} 的水体密度较大,水体将在重力作用下向下运动,渗透进入到生物礁、生屑滩、潮坪碳酸钙沉积物的下部及滩间、礁间沉积物中,使这些沉积物发生白云石化,模式图见图 11。

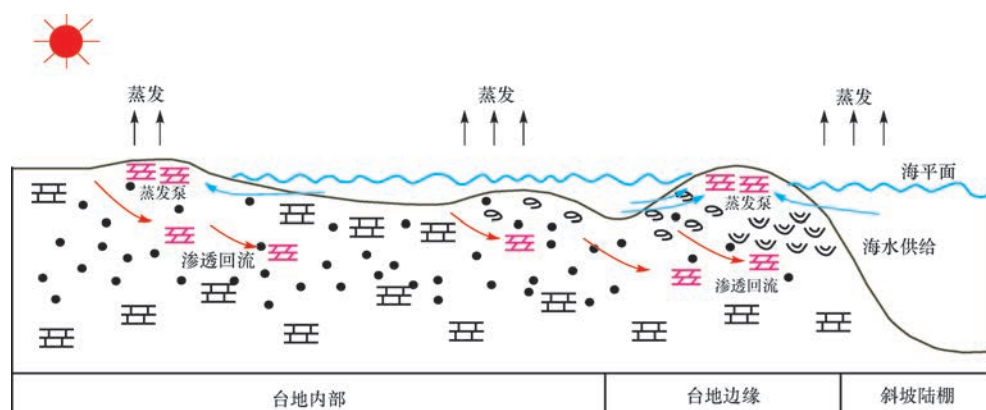


图 11 元坝地区长兴组同生期高盐度蒸发及回流渗透白云石化作用模式

Fig. 11 Model of syngenetic evaporative and seepage-reflux dolomitization under high salinity in the Changxing Formation, Yuanba area

4.2 早成岩期浅埋藏白云石化模式

晚二叠世长兴期到早三叠世末,粉-细晶自形白云石交代原岩类型多样,可在生物礁灰岩、藻粘结灰岩、生屑灰岩、生屑微晶灰岩等中发育,不仅交代沉积组分,还交代早期成岩组分。该类白云石形成于 Mg^{2+} 相对不足,成岩流体为海水或与海水相似的高盐度地层水,由于上覆地层的压实作用,地层水在弱固结的沉积物中运动而发生白云石化,由于 Mg^{2+} 供给相对不足,白云石结晶缓慢,形成自形程度较好的白云石晶体,并致白云石往往呈斑状、分散状或偶见分布^[26]。具体模式见图 12。

4.3 早成岩期热液白云石化模式

元坝地区长兴组热液成因白云石表现形式多样,主要为生物礁灰岩骨架间孔洞海底胶结物末端热液白云石的沉淀和交代、生物体腔内的交代、溶蚀孔洞边缘热液白云石的生长、不规则热液白云石斑块的发育,该

期热液作用形成的时间较早且持续时间较长,从晚二叠世至早三叠世末,为峨眉地裂运动期,此时张性断裂活动表现最强,同时伴随着大范围峨眉山玄武岩的喷发,研究区古热流值达到最高峰,与岩浆活动有关的富镁超咸热卤水沿着张性断裂体系进入长兴组地层中,富镁超咸热卤水实质上是上升热液与地层流体的混合物, Mg^{2+} 来源于上升热液和地层内部流体,流体运动不仅限于断裂附近,可在较广大的范围内活动,因此,形成较为广泛分布的热液成因的粉-细晶白云石和中粗晶白云石等^[27],具体模式见图 13。

5 结论

1) 元坝地区长兴组生物礁白云岩的不同类型白云石具有不同的岩相学、有序度、碳氧同位素、稀土元素等特征,反映了不同成岩阶段白云石化流体导致的白云石化作用。

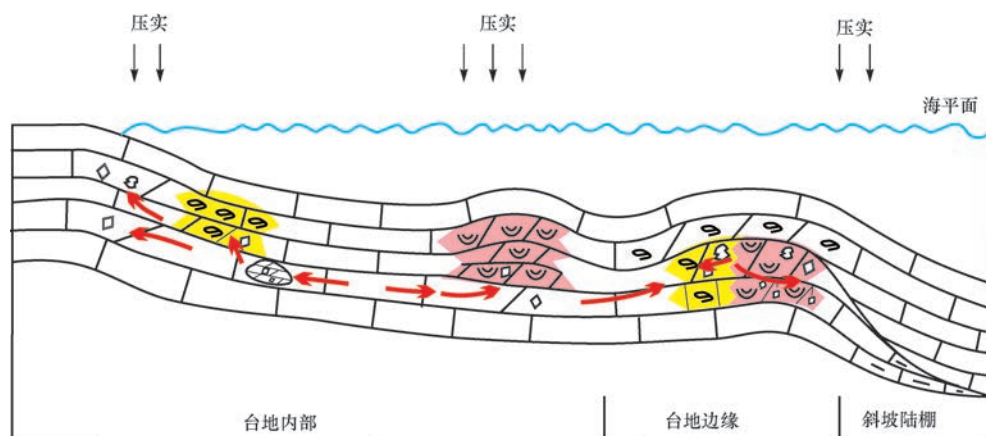


图 12 元坝地区长兴组早成岩期浅埋藏白云石化作用模式

Fig. 12 Model of shallow burial dolomitization in early diagenetic stage in the Changxing Formation, Yuanba area

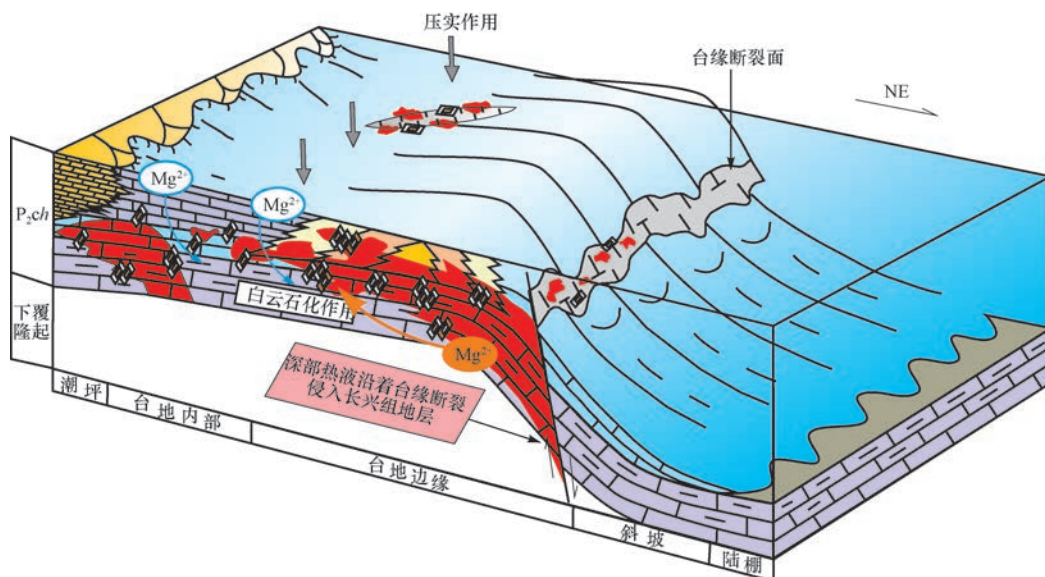


图13 元坝地区长兴组早成岩期热液白云石化作用模式

Fig. 13 Model of hydrothermal dolomitization in early diagenetic stage in the Changxing Formation, Yuanba area

2) 同生期高盐度蒸发和回流渗透白云石化作用、浅埋藏白云石化作用和早成岩期热液白云石化作用形成的白云岩控制了长兴组生物礁白云岩储层质量和分布。

3) 早成岩期热液白云石化作用的白云石化流体来源于峨眉地裂运动期间的玄武岩喷发岩浆活动有关的富镁超咸热卤水。

参 考 文 献

- [1] 马永生,蔡勋育,赵培荣. 元坝气田长兴组-飞仙关组礁滩相储层特征和形成机理[J]. 石油学报, 2014, 35(6): 1001-1011.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. Characteristics and formation mechanisms of reef-shoal carbonate reservoirs of Changxing-Feixianguan formations, Yuanba gas field [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 35(6): 1001-1011.
- [2] 韩定坤,傅恒,刘雁婷. 白云石化作用对元坝地区长兴组储层发育的影响[J]. 天然气工业, 2011, 31(10): 22-26.
Han Dingkun, Fu Heng, Liu Yanting. Effect of dolomitization on the development of reservoirs in the Changxing Fm in the Yuanba area [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(10): 22-26.
- [3] 田永净,马永生,刘波,等. 川东北元坝气田长兴组白云岩成因研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(9): 2766-2776.
Tian Yongjing, Ma Yongsheng, Liu Bo, et al. Dolomitization of the Upper Permian Changxing Formation in Yuanba gas field, NE Sichuan Basin, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(9): 2766-2776.
- [4] 龙胜祥,游瑜春,刘国萍,等. 元坝气田长兴组超深层缓坡型礁滩相储层精细刻画[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(6): 994-1000.
Long Shengxiang, You Yuchun, Liu Guoping, et al. Fine characterization of ultra-deep reef-shoal reservoirs of ramp-type in Changxing Formation in Yuanba gas field, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6): 994-1000.
- [5] 武恒志,李忠平,柯光明. 元坝气田长兴组生物礁气藏特征及开发对策[J]. 天然气工业, 2016, 36(9): 11-19.
Wu Hengzhi, Li Zhongping, Ke Guangming. Characteristics of the Changxing Fm biohermal gas reservoir in the Yuanba Gasfield, Sichuan Basin and development countermeasures [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(9): 11-19.
- [6] 赵文智,沈安江,郑剑锋,等. 塔里木、四川及鄂尔多斯盆地白云岩储层孔隙成因探讨及对储层预测的指导意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(9): 1925-1939.
Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, et al. The porosity origin of dolomite reservoirs in the Tarim, Sichuan and Ordos basins and its implication to reservoir prediction [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(9): 1925-1939.
- [7] 孟万斌,武恒志,李国蓉,等. 川北元坝地区长兴组白云石化作用机制及其对储层形成的影响[J]. 岩石学报, 2014, 30(3): 699-708.
Meng Wanbin, Wu Hengzhi, Li Guorong, et al. Dolomitization mechanisms and influence on reservoir development in the Upper Permian Changxing Formation in Yuanba area, northern Sichuan Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(3): 699-708.
- [8] 赵锐,吴亚生,齐恩广,等. 川东北上二叠统长兴组白云岩地球化学特征及形成机制[J]. 古地理学报, 2014, 16(5): 747-760.
Zhao Rui, Wu Yasheng, Qi Enguang, et al. Geochemistry and origin of dolomites of the Upper Permian Changxing Formation in northeastern Sichuan basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(5): 747-760.
- [9] 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京:地质出版社, 2010: 178-207.
Huang Sijing. Carbonate diagenesis [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010: 178-207.
- [10] 朱东亚,金之钧,胡文瑄. 塔北地区下奥陶统白云岩热液重结晶作用及其油气储集意义[J]. 中国科学:地球科学, 2010, 40(2): 156-170.

- Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wenxuan. Hydrothermal recrystallization of the Lower Ordovician dolomite and its significance to reservoir in northern Tarim basin [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2010, 40 (2): 156–170.
- [11] 江青春, 胡素云, 汪泽成, 等. 四川盆地中二叠统中一粗晶白云岩成因[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(4): 503–510.
- Jiang Qingchun, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Genesis of medium-macro-crystalline dolomite in the Middle Permian of Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(4): 503–510.
- [12] 张文. 川西-北地区中二叠统白云岩储层成因及控制因素[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- Zhang Wen. The dolostone reservoirs from the Middle Permian in northwestern Sichuan Basin: Genesis and controlling factors [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [13] 杜金虎, 徐春春, 汪泽成, 等. 四川盆地二叠—三叠系礁滩天然气勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 66–88.
- Du Jinhu, Xu Chunqun, Wang Zecheng, et al. Natural gas exploration of Permian-Triassic reef and oolite in Sichuan basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 66–88.
- [14] 张继庆, 李汝宁, 官举铭, 等. 四川盆地及邻区晚二叠世生物礁[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1990: 105–108.
- Zhang Jiqing, Li Runing, Guan Juming, et al. The late Permian reef in Sichuan basin and its adjacent area [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1990: 105–108.
- [15] 焦存礼, 何治亮, 邢秀娟, 等. 塔里木盆地构造热液白云岩及其储层意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(1): 278–284.
- Jiao Cunli, He Yeliang, Xin Xiujuan, et al. Tectonic hydrothermal dolomite and its significance of reservoirs in Tarim basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 278–284.
- [16] 李志明, 徐二社, 范明, 等. 普光气田长兴组白云岩地球化学特征及其成因意义[J]. *地球化学*, 2010, 39(4): 371–380.
- Li Zhiming, Xu Erdi, Fan Ming, et al. Geochemical characteristics and formation of dolostones from the Changxing Formation at Puguang gas field in Sichuan basin [J]. *Geochimica*, 2010, 39(4): 371–380.
- [17] 刘伟, 黄擎宇, 王坤, 等. 塔里木盆地热液特点及其对碳酸盐岩储层的改造作用[J]. *天然气工业*, 2016, 36(3): 14–21.
- Liu Wei, Huang Qingyu, Wang Kun, et al. Characteristics of hydrothermal activity in the Tarim Basin and its reworking effect on carbonate reservoirs [J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(3): 14–21.
- [18] 赵彦彦, 郑永飞. 碳酸盐沉积物的成岩作用[J]. *岩石学报*, 2011, 27(2): 501–519.
- Zhao Yanyan, Zheng Yongfei. Diagenesis of carbonate sediments [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(2): 501–519.
- [19] 王小林, 金之钧, 胡文瑄, 等. 塔里木盆地古生界白云石微区REE配分特征及其成因研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2009, 39(6): 721–733.
- Wang Xiaolin, Jin Zhijun, Hu Wenxuan, et al. Using in situ REE analysis to study the origin and diagenesis of dolomite of Lower Paleozoic, Tarim basin [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2009, 39(6): 721–733.
- [20] 韩晓涛, 鲍征宇, 谢淑云, 等. 四川盆地西南中二叠统白云岩的地球化学特征及其成因[J]. *地球科学*, 2016, 41(1): 168–173.
- Han Xiaotao, Bao Zhengyu, Xie Shuyun, et al. Origin and geochemical characteristics of dolomites in the middle Permian Formation, SW Sichuan basin, China [J]. *Earth Science*, 2016, 41(1): 168–173.
- [21] 王珏博, 谷一凡, 陶艳忠, 等. 川中地区茅口组两期流体叠合控制下的白云石化模式[J]. *沉积学报*, 2016, 34(2): 236–248.
- Wang Juebo, Gu Yifan, Tao Yanzhong, et al. The model of dolomitization jointly controlled by two-episode fluids in Maokou Formation in central Sichuan basin. [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(2): 236–248.
- [22] 李小宁, 黄思静, 黄可可, 等. 四川盆地中二叠统栖霞组白云石化海相流体的地球化学依据[J]. *天然气工业*, 2016, 36(10): 35–45.
- Li Xiaoning, Huang Sijing, Huang Keke, et al. Geochemical characteristics of Middle Permian Qixia Fm dolomitized marine fluids in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(10): 35–45.
- [23] 郭铁, 谢淑云, 张殿伟, 等. 川南地区灯影组白云岩地球化学特征及流体来源[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(5): 721–730.
- Wu Tie, Xie Shuyun, Zhang Dianwei, et al. Geochemical characteristics and fluids origin of the Dengying Formation dolomites in southern Sichuan basin [J]. *Oil and Gas Geology*, 2016, 37(5): 721–730.
- [24] 李宏涛, 肖开华, 龙胜祥, 等. 四川盆地元坝地区长兴组生物礁储层形成控制因素与发育模式[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(5): 744–755.
- Li Hongtao, Xiao Kaihua, Long Shengxiang, et al. Controlling factors and development models of biohermal reservoirs of the Changxing Formation in Yuanba area, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(5): 744–755.
- [25] 严丽, 冯明刚, 张春燕. 川东北元坝地区长兴组油气藏成藏模式[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2011, 8(10): 19–21.
- Yan Li, Feng Minggang, Zhang Chunyan. Hydrocarbon accumulation mode of Changxing Formation in YB area of northeastern Sichuan basin [J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2011, 8(10): 19–21.
- [26] Philip W Choquette E H. Shallow-burial dolomite cement: a major component of many ancient sucrosic dolomites [J]. *Sedimentology*, 2008, 55: 423–460.
- [27] 刘树根, 王一刚, 孙玮, 等. 拉张槽对四川盆地海相油气分布的控制作用[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(1): 1–23.
- Liu Shugen, Wang Yigang, Sun Wei, et al. Control of intracratonic sags on the hydrocarbon accumulations in the marine strata across the Sichuan basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2016, 43(1): 1–23.

(编辑 张亚雄)