

川西北下二叠统栖霞组斑马状白云岩 地球化学特征及形成过程

——以ST18井为例

王利超¹, 周 杨¹, 胡林辉², 张 亚³, 王柏智¹, 乔艳萍³

1. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 成都 610500;

2. 中国石油 东方地球物理公司 西南物探分公司, 成都 610213;

3. 中国石油 西南油气田分公司 勘探开发研究院, 成都 610041

摘要:四川盆地地下二叠统栖霞组具有丰富的天然气资源。近年来,川西北地区在栖霞组取得了重大的油气勘探突破,其中优质储层主要位于白云岩层位。然而,有关该区栖霞组白云岩的成因至今仍有争议。ST18井钻遇栖霞组,岩心观察发现特殊的斑马状白云岩。针对斑马结构中的亮带和暗带,系统开展了岩石学和地球化学的对比研究。斑马结构中亮带由中粗晶—鞍形白云石组成,阴极发光呈亮红色;而暗带则由中—细晶白云石组成,阴极发光呈暗红色。亮带和暗带白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均在同时期海水 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围内,而 $\delta^{18}\text{O}$ 值较同时期海水偏负,表明白云石化流体来源于海水,且受到较高温度的影响,使得氧同位素发生分馏。亮、暗带白云石有序度均较高,推测是在后期埋藏作用下发生了调整,使得有序度增加到同一水平。此外,热液矿物黄铁矿的发现进一步证实了白云岩形成过程中热液流体的参与。研究表明,ST18井栖霞组斑马状白云岩的形成过程主要经历了以下三个阶段:(1)流体沿着构造裂缝溶蚀—交代原始灰岩,形成暗带白云石;(2)热流体沉淀形成亮带白云石;(3)深埋藏环境下亮暗带白云石均发生调整,形成有序度较高的斑马状白云岩。

关键词:热液白云岩;白云石有序度;斑马结构;栖霞组;下二叠统;川西北

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Geochemical characteristics and formation process of zebra dolomites in Lower Permian Qixia Formation, northwestern Sichuan Basin:

a case study of well ST 18

WANG Lichao¹, ZHOU Yang¹, HU Linhui², ZHANG Ya³, WANG Bozhi¹, QIAO Yanping³

1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

2. Southwest Geophysical Prospecting Branch of PetroChina Eastern Geophysical Exploration Company, Chengdu, Sichuan 610213, China;

3. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610041, China

Abstract: Abundant natural gas resources are stored in the Lower Permian Qixia Formation of the Sichuan Basin. In recent years, great breakthrough for oil and gas exploration has been achieved in the Qixia Formation in the NW Sichuan Basin, and high-quality reservoirs mainly locate in dolomite strata. However, the origin of dolomites in the Qixia Formation is still unclear. Special zebra-textured dolomites were observed in the Qixia Formation from the cores of well ST 18. In this paper, a comparative study of the light and dark belts in the zebra texture was systematically carried out with petrological and geochemical methods. Results show that the light belt is mainly composed of medium to coarse crystalline saddle dolomites and its cathodoluminescence is bright red, while the dark zone is composed of medium to fine crystalline dolomites and its cathodoluminescence is dark red. The $\delta^{13}\text{C}$ values in light and dark zones are within the $\delta^{13}\text{C}$ range of contemporary seawater, while the $\delta^{18}\text{O}$ values are more negative than those of contemporary seawater. It is then indicated that the dolomitization fluid was derived from seawater and the oxygen isotopes were fractionated by the affection of high temperature. The order degrees of dolomites in the light and dark zones are consistently high. It was speculated that the order degrees of dolomites in the light and dark zones had been

收稿日期:2022-01-19;修订日期:2022-04-26。

作者简介:王利超(1988—),女,博士,讲师,从事碳酸盐岩储层地质学相关研究。E-mail: wanglichaohappy@126.com。

基金项目:中国石油—西南石油大学创新联合体科技合作项目“深层碳酸盐岩成烃—成储—成藏理论及目标区块优选技术”(2020CX010301)资助。

matured to the same degree during the later burial stage. In addition, the occurrence of pyrite confirmed the involvement of hydrothermal fluids in the formation of dolomites. Therefore, the formation of zebra dolomites in well ST 18 mainly went through the following three stages: (1) Fluids dissolved and dolomitized primary limestones along tectonic fractures to form medium to fine crystalline dolomites in the dark zone; (2) Hot fluids precipitated to form medium to coarse crystalline saddle dolomites in the light zone; (3) The order degrees of dolomites in the dark and light zones had adjusted to the same degree in the later deep burial stage.

Key words: hydrothermal dolomite; order degree of dolomite; zebra texture; Qixia Formation; Lower Permian; northwestern Sichuan Basin

四川盆地二叠系栖霞组白云岩储层是天然气勘探中的重点对象之一。近年来,川西北地区部署的多口并在栖霞组白云岩储层中均获高产工业气流,引起了人们的广泛关注^[1-2]。前人针对川西北栖霞组白云岩的成因开展了大量研究工作,对栖霞组白云石化作用的解释有多种,如淋滤玄武岩模式^[3]、埋藏白云石化^[4]、构造热液白云石化^[5]、热对流模式^[6],以及多阶段白云石化作用的叠加等^[7]。其中,多数白云石化作用都与峨眉山大火成岩省(Emei Large Igneous Provinces, ELIP)活动有关^[8]。

典型的热液白云岩具有斑马结构、水力压裂角砾岩、鞍形白云石、黄铁矿等岩石学特征^[9]。斑马结构是世界范围内地质构造中常见的周期性结构,常与热液成矿作用有关;在岩石中交替出现的粗粒浅色(亮带)和细粒深色(暗带)通常被称为斑马结构^[10-11]。前人研究表明,斑马状白云岩暗带的成因主要是交代宿主灰岩形成,而对于斑马状白云岩亮带的成因还存在分歧,目前主要有两种主流观点:(1)交代作用或重结晶作用;(2)直接沉淀,即在暗带的白云岩中发生溶蚀作用形成开放空间,受到热液流体脉冲式作用进而从流体中直接沉淀白云石形成^[12]。

四川盆地栖霞组受峨眉山大火成岩省的影响,局部发育热液白云岩^[9]。川西南地区位于峨眉山超级地幔柱的“中带”^[12],已有斑马状白云岩的发育报道^[13]。而川西北地区位于峨眉山超级地幔柱的“外带”^[12,14],相对于川西南地区而言受热液的影响较小,斑马状白云岩的出露少见,因而研究甚少。鉴于此,本文针对川西北下二叠统栖霞组井下岩心中出现的斑马状白云岩,展开系统的岩石学观察,在此基础上针对斑马结构中的亮带和暗带,分别取样开展地球化学分析,以探讨斑马状白云岩的形成过程。

1 区域地质概况

ST18 井位于四川盆地西北部,在大地构造位

置上属于扬子板块西北边缘(图 1a),且位于三个构造单元过渡带(图 1b)。瓜德鲁普统(Guadalupian)沉积晚期(约 268 Ma),由于峨眉山大火成岩省(ELIP)的强烈构造运动和古特提斯洋壳向扬子板块的俯冲作用,整个扬子克拉通在构造上处于拉张环境^[6]。峨眉山大火成岩省的活动,导致四川盆地在较长一段时间内处于异常高地温中,尽管川西北地区远离活动中心,但热流值仍高达 70 mW/m²^[14]。

本次研究主要针对四川盆地西北部下二叠统栖霞组的斑马状白云岩,栖霞组下伏梁山组,上覆茅口组,与国际地层单位中的乌拉尔统空谷阶(Kungurian)相对应,年龄约为 283.5~272.95 Ma^[17]。川西北地区的栖霞组主要发育灰色—浅灰色白云岩和灰色—深灰色灰岩^[18]。

2 采样及分析方法

针对 ST18 井栖霞组地层中的斑马状白云岩,自下而上共取岩心样品 10 件,取样深度介于 7 636.47~7 639.47 m(图 1c)。本文在系统岩心观察和描述的基础上,对采集的岩心样品磨制薄片。通过薄片鉴定、阴极发光和扫描电镜分析,对白云岩的晶体结构、晶体大小、晶体类型等方面进行精细研究。薄片鉴定使用型号为 Olympus BX53 的偏光显微镜,阴极发光分析仪器型号为 CL8200 MK5,扫描电镜分析仪器型号为 Quanta 650 FEG。以上实验均在西南石油大学地球科学与技术学院实验室完成。

在上述岩石学系统观察的基础上,针对斑马结构中的亮带和暗带分别取样,进行岩石粉末(200 目)磨制,并完成 X-射线粉末衍射实验和碳酸盐岩碳、氧同位素(粉末样品)测试。X-射线粉末衍射实验在西南石油大学新能源与材料学院完成,仪器型号为 DX-2700。利用 CuK α 辐射波长($\lambda = 1.540 6 \text{ \AA}$, $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$)记录样品的衍射谱图,通过 Jade 软件对衍射数据进行物相鉴定和定量分析,确定白云石样品的矿物成分、晶胞参数、有序度及化学计量等信息。碳、氧同位素测试在中国

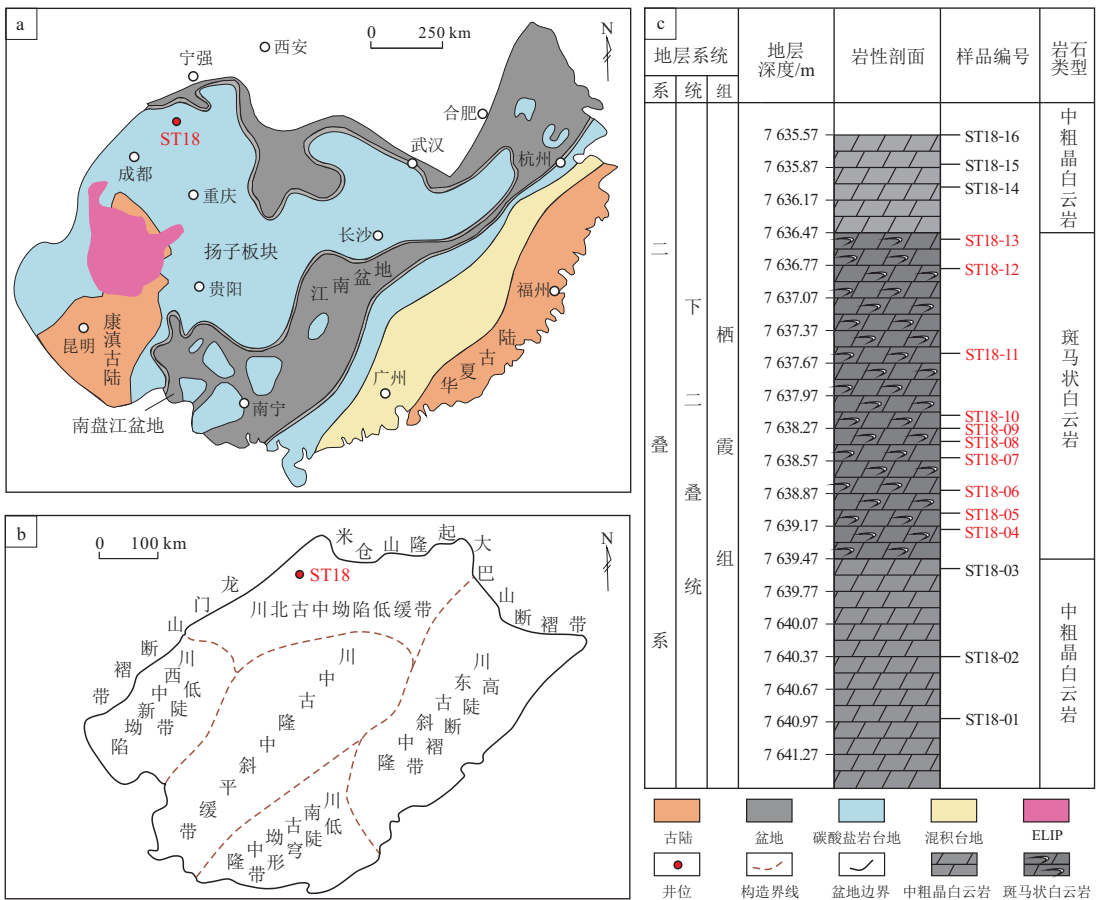


图 1 川西北 ST18 井区域地质简图及地层柱状图

a.ST18 井大地构造位置(据参考文献[15]修改);b.ST18 井构造带位置(据参考文献[16]修改);c.ST18 井地层柱状图

Fig.1 Regional geological sketch and stratigraphic histogram of well ST 18, northwestern Sichuan Basin

科学院南京地质古生物研究所实验技术中心同位素实验室完成,同位素质谱仪主机型号为 MAT-253,制样系统为 Kiel IV Carbonate Device,标样为 GBW-0440LC5。碳氧同位素值用‰表示(相对 PDB 标准), $\delta^{13}C_{PDB}$ 和 $\delta^{18}O_{PDB}$ 测定值标准偏差分别小于 0.020‰和 0.050‰。

3 岩石学特征

斑马状碳酸盐岩的岩心观察发现,其岩性主要为白云岩。在岩心观察的基础上,通过镜下薄片鉴定,根据白云石的晶体大小、自形程度和晶体结构^[19],将 ST18 井中的斑马状白云岩分为斑马状白云岩暗带(B)和斑马状白云岩亮带(W)。

3.1 斑马状白云岩

斑马状白云岩由深灰黑色暗带白云石和浅灰白色亮带白云石组成,形成暗带、亮带交替出现的斑马结构。斑马结构的大小为厘米级,暗带的宽度小于亮带,暗带条纹宽为 0.5~1.0 cm,亮带条纹宽为 0.5~2.0 cm(图 2a)。单偏光下,斑马状白云岩中未见生物碎屑,原始结构不明显(图 2b)。可见

亮带白云石和暗带白云石交替出现的韵律旋回,且它们之间界限清晰(图 2b)。亮带白云石(W)由中粗晶白云石和鞍形白云石组成,晶面洁净,中粗晶白云石的晶面特征是以非平直晶面他形为主,其次为平直晶面自形,晶体粗大(图 2b)。鞍形白云石通常充填于亮带的溶蚀孔洞或裂缝中(图 2c),可见孔洞和裂缝周围的非平直晶面他形晶向非平直晶面鞍形晶过渡的趋势(图 2b 红色箭头所指)。鞍形白云石晶面弯曲(图 2d 蓝色箭头所指),晶体大小通常在 800 μm 左右,正交偏光下呈明显的波状消光,可见亮带白云石穿越亮暗带边界,且边界两侧的光学性质相同(图 2e 黄色箭头所指)。暗带白云石(B)主要由深色半自形—他形细晶白云石组成,晶粒较小,晶体间呈曲面接触,晶面浑浊,表面可见残余原始组构或其他黑色有机质(图 3a)。此外,可观察到斑马状白云岩中缝合线截断切穿白云石晶体(图 2f 黄色箭头所指)。

阴极发光下,亮带和暗带具有不同的阴极发光特征。亮带里的中粗晶白云石发亮红色光,暗带里的中细晶白云石发暗红色光(图 3b)。亮带中的鞍

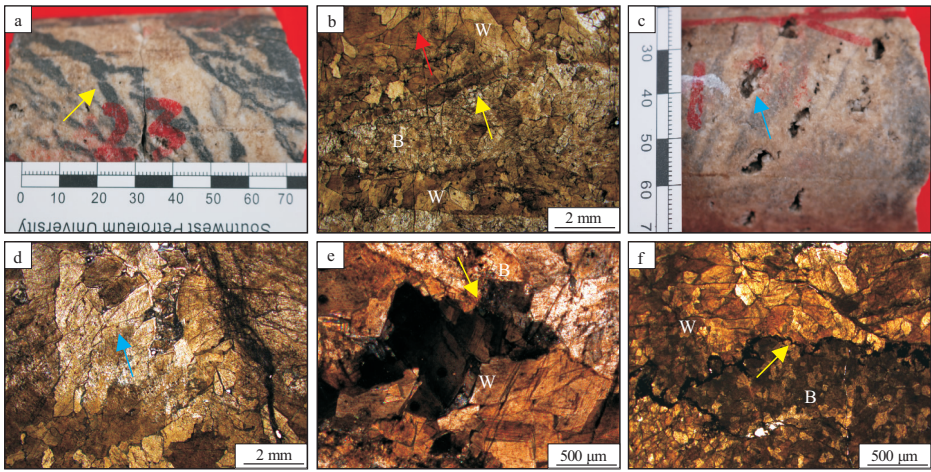


图 2 川西北 ST18 井栖霞组斑马状白云岩的岩石学特征

a. 斑马状白云岩岩心, 斑马结构, ST18 井, 7 638.93~7 639.01 m; b. 斑马状白云岩薄片镜下特征, 靠近开放空间的亮带白云石有晶粒增大的趋势 (红色箭头方向), ST18-04, 单偏光; c. 斑马状白云岩岩心, 鞍形白云石胶结物 (蓝色箭头所指) 充填在溶孔中, ST18 井, 7 637.77~7 637.97 m; d. 沿裂缝发育的鞍形白云石, 弯曲晶面 (蓝色箭头所指), ST18-07, 单偏光; e. 斑马状白云岩中亮暗带界限处白云石波状消光特征, ST18-04, 正交偏光; f. 斑马状白云石晶体被缝合线切穿 (黄色箭头所指), ST18-03, 单偏光

Fig.2 Petrological characteristics of zebra dolomites in Qixia Formation, well ST 18, northwestern Sichuan Basin

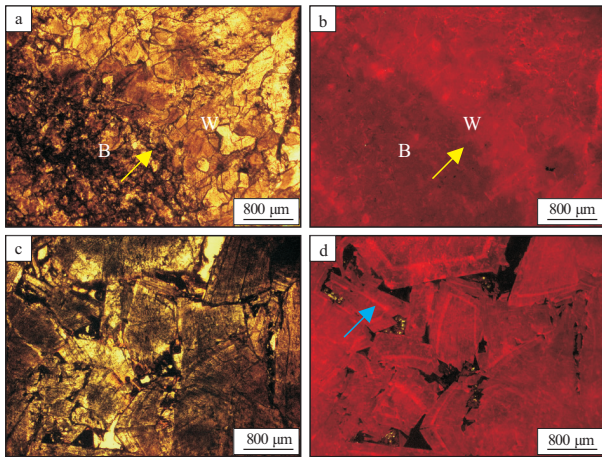


图 3 川西北 ST18 井栖霞组斑马状白云岩薄片观察及阴极发光特征

a. 斑马状白云岩, 亮带为中—粗晶白云岩, 暗带为中—细晶白云石, 表面附着有机质, ST18-06, 单偏光; b. 视域 a 的阴极发光, 亮带发亮红色光, 暗带发暗红色光; c. 鞍形白云石, 发育在溶蚀孔洞中, 具有溶蚀残余结构, ST18-03, 单偏光; d. 视域 c 的阴极发光, 可见鞍形白云石核部发暗红色光, 边缘为亮红色环带结构 (蓝色箭头)

Fig.3 Thin section observation and cathodoluminescence characteristics of zebra dolomites in Qixia Formation, well ST 18, northwestern Sichuan Basin

形白云石的阴极发光特征表现为晶体核心发较弱的暗红色光, 晶体边缘具有明显的亮红色环带特征 (图 3d)。

3.2 热液矿物

岩心观察时发现, ST18 井栖霞组斑马状白云岩的裂缝中有金属矿物充填 (图 4a, 黄色箭头所指)。薄片鉴定可见不透明矿物分布在裂缝或白云石晶体中, 且通常与鞍形白云石伴生 (图 4b)。

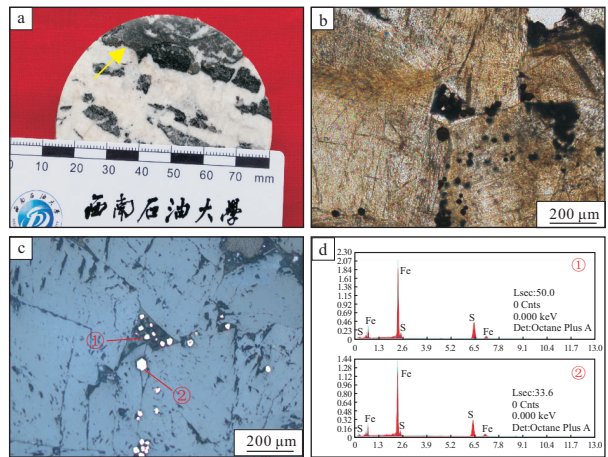


图 4 川西北 ST18 井栖霞组热液矿物特征

a. 斑马状白云岩岩面, 黄铁矿沿裂缝分布 (黄色箭头所指), ST18-05; b. 粗晶鞍形白云石与黄铁矿伴生, 鞍形白云石表面洁净, 晶间溶孔充填黄铁矿, ST18-11, 单偏光; c. 视域 b 的反射光观察, 黄铁矿发亮黄色金属光; d. 视域 c 中①和②位置处的能谱分析图

Fig.4 Characteristics of hydrothermal minerals in Qixia Formation, well ST 18, northwestern Sichuan Basin

反射光下, 矿物发亮黄色金属光泽 (图 4c)。通过扫描电镜能谱分析, 确定其矿物成分为黄铁矿 (图 4d)。综上所述, 黄铁矿呈点状分布的八面体型, 主要发育在溶蚀孔洞附近, 或与鞍形白云石伴生。

4 地球化学特征

4.1 白云石晶体结构特征

本次研究通过 X-射线粉末衍射实验 (X-Ray Powder Diffraction, XRPD), 研究白云石晶体的晶胞参数、化学计量和有序度等特征。

白云石属于三方晶系,晶胞参数用 a 、 b 、 c 来表示,其中 $a=b \neq c$ 。理想白云石的标准晶胞参数是 $a=4.8069 \text{ \AA}$, $c=16.0034 \text{ \AA}$ ^[20]。以 a 值为横坐标, c 值为纵坐标,建立晶胞参数分布图(图 5a)。以理想白云石的晶胞参数为基准,亮带和暗带白云石晶胞参数位于理想白云石的右上方(图 5a)。斑马状结构亮带中,中粗晶白云石的晶胞参数 a 值范围为 $4.8072 \sim 4.8100 \text{ \AA}$,平均值为 4.8090 \AA , c 值范围为 $16.0088 \sim 16.0187 \text{ \AA}$,平均值为 16.0145 \AA ;鞍形白云石的晶胞参数 a 值范围为 $4.8093 \sim 4.8245 \text{ \AA}$,平均值为 4.8147 \AA , c 值范围为 $16.0171 \sim 16.0240 \text{ \AA}$,平均值为 16.0197 \AA 。斑马状结构中暗带白云石的晶胞参数 a 值范围为 $4.8109 \sim 4.8118 \text{ \AA}$,平均值为 4.8113 \AA ; c 值范围为 $16.0132 \sim 16.0228 \text{ \AA}$,平均值为 16.0155 \AA 。

XRPD 分析表明,白云石为主要矿物,且不含方解石。用计算公式: $x(\text{MgCO}_3) = 1011.99 - 333.33d_{(104)}$ ($d_{(104)}$ 是以 \AA 为单位的峰值位置^[21]) 计算得出 MgCO_3 摩尔分数。样品中的白云石具有接近化学计量比的成分 [$x(\text{MgCO}_3) = 49\% \sim 54\%$, 平均值 50%], 从而确定了白云岩样品由一种理想的白云

石组成 ($\text{Mg}/\text{Ca} = 1$)。对 ST18 井中不同类型白云石的 MgCO_3 摩尔分数进行投点(图 5b)。斑马结构亮带中,中粗晶白云石的 MgCO_3 摩尔分数范围为 $49.40\% \sim 50.37\%$, 平均值为 49.65% ; 鞍形白云石的 MgCO_3 摩尔分数范围为 $49.47\% \sim 53.63\%$, 平均值为 51.11% 。斑马结构中暗带白云石的 MgCO_3 摩尔分数范围为 $48.60\% \sim 49.37\%$, 平均值为 49.15% 。

白云石的有序度通过 $d_{(015)} : d_{(110)}$ 反射峰的比值半定量测定, 其中有序度 $\sigma = I_{(015)} / I_{(110)}$ ^[22], $I_{(015)}$ 和 $I_{(110)}$ 分别为对应反射峰的强度。对 ST18 井中不同类型白云石的有序度进行投点(图 5c) 发现, 斑马结构亮暗带白云石的有序度均较高。斑马结构亮带中, 中粗晶白云石的有序度变化范围是 $0.79 \sim 0.83$, 平均值是 0.82 ; 鞍形白云石的有序度变化范围是 $0.77 \sim 0.97$, 平均值是 0.85 。斑马结构中暗带白云石的有序度变化范围较大, 在 $0.63 \sim 0.89$ 之间, 平均值是 0.70 。

4.2 碳氧同位素特征

二叠纪海水的碳氧同位素值范围分别是 $0 \sim 5.5\text{‰}$ 和 $-5\text{‰} \sim -0.5\text{‰}$ ^[23]。从斑马状白云岩亮暗带碳氧同位素值投点(图 5d) 发现, 样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值

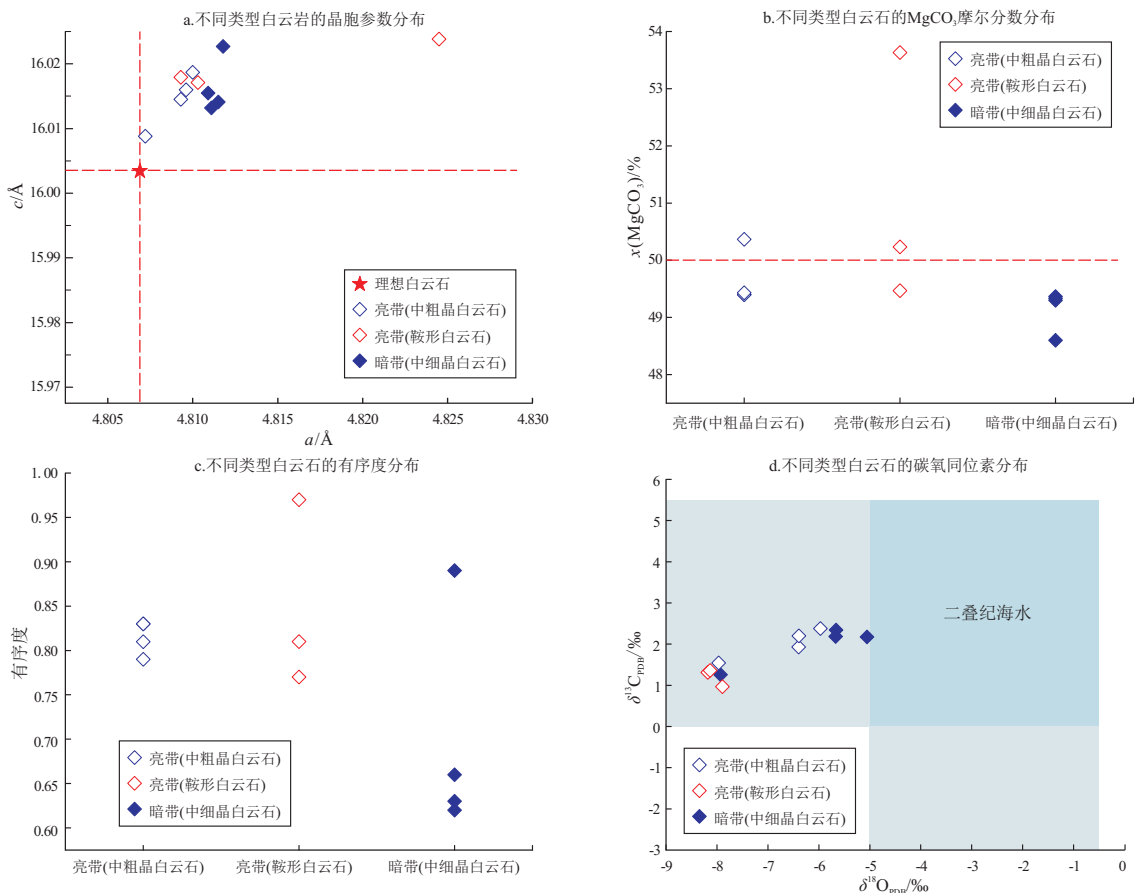


图5 川西北 ST18 井栖霞组斑马状白云岩地球化学特征

Fig.5 Geochemical characteristics of zebra dolomites in Qixia Formation, well ST 18, northwestern Sichuan Basin

在同时期海水 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围内,样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值都较同时期海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负。斑马结构亮带中中粗晶白云石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值变化范围为 $1.54\text{‰} \sim 2.38\text{‰}$, 平均值是 2.01‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值变化范围为 $-7.97\text{‰} \sim -5.97\text{‰}$, 平均值是 -6.68‰ ; 鞍形白云石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值变化范围为 $0.97\text{‰} \sim 1.36\text{‰}$, 平均值是 1.21‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值变化范围为 $-8.18\text{‰} \sim -7.89\text{‰}$, 平均值是 -8.07‰ 。暗带中白云石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值变化范围为 $1.26\text{‰} \sim 2.18\text{‰}$, 平均值是 1.99‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值变化范围为 $-7.93\text{‰} \sim -5.06\text{‰}$, 平均值是 -6.08‰ 。

5 讨论

5.1 白云石化流体性质

斑马状白云岩由深灰色细粒(暗带)和浅灰白色粗粒(亮带)白云石组成,呈平行或网状分布(图 2a)。显微观察发现,斑马结构中暗带由中—细晶白云石组成,白云石晶体为平直面半自形晶,晶粒较小,晶面浑浊,表面可见残余原始组构或其他黑色有机质。阴极发光下暗带白云石晶体主要发暗红色光(图 3b),指示其白云石化流体来源于海水^[19]。同时,暗带白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(平均值是 1.99‰)落在同期海水 $\delta^{13}\text{C}$ 范围内(图 5d),亦表明暗带白云石的白云石化流体来源于海水。由此可见,暗带白云石的岩石学特征和地球化学特征都表明其白云石化流体来源于海水。斑马结构中亮带由中—粗晶白云石和鞍形白云石组成,晶体具有非平直面他形—非平直面鞍形晶及波状消光的特征,说明亮带白云石是在高温作用下快速结晶形成的^[10]。亮带白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(中粗晶白云石的平均值是 2.01‰ ; 鞍形白云石的平均值是 1.21‰)亦落在同期海水 $\delta^{13}\text{C}$ 范围内(图 5d),表明亮带白云石的白云石化流体也可能来源于海水。前人对川西北栖霞组白云岩进行碳氧稳定同位素和锶同位素相关分析后认为,基质白云岩的白云石化流体是海水^[6,24],这和我们通过碳同位素研究得出的认识是一致的。此外,可见斑马状白云岩中发育缝合线,并且缝合线切穿白云石晶体(图 2f)。由于在碳酸盐岩中缝合线形成的深度约为 500 m ^[25],因此,斑马状白云岩的白云石化流体主要来源于浅埋藏地层中的海水。

斑马状白云岩中暗带和亮带白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围相似,与同时期海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值比均较为偏负(图 5d)。因此,来源于海水的白云石化流体受到了热的影响,使得氧同位素发生分馏。其中,亮带白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(中粗晶白云石平均值为

-6.68‰ ; 鞍形白云石的平均值为 -8.07‰)比暗带白云石(平均值为 -6.08‰)更偏负,表明在亮带形成过程中造成氧同位素分馏的热效应更强。

岩心观察和显微扫描观察到的黄铁矿(图 4a, c),是川西北栖霞组热液白云岩中典型热液矿物之一^[26]。亮带中的鞍形白云石与热液矿物黄铁矿相伴生,且鞍形白云石 $\delta^{18}\text{O}$ 值(平均值为 -8.07‰)偏负,表明亮带白云石的形成是在海水来源的基础上叠加了热液。

5.2 斑马状白云岩的形成过程

斑马结构中暗带白云石与亮带白云石的岩石学特征(白云石晶体大小和白云石阴极发光特征等)不同,且晶面混浊的暗带白云石与晶面洁净的亮带白云石之间具有非常清晰的边界(图 2e),暗示其成因可能不同。在正交偏光下,可见白云石晶体穿过亮带白云石和暗带白云石的边界(图 2e),且在边界两侧白云石的消光性质一致,表明亮带白云石是生长在暗带白云石上的胶结物^[11]。与此同时,亮带白云石晶体大小从边界处向亮带中心处逐渐变大(图 2b 红色箭头所示),亦表明亮带白云石是在晶体竞争结晶的过程中逐步结晶形成的^[27-28]。暗带中白云石晶面混浊,包含了大量来自沉积先驱体的包裹体,因此暗带白云石是交代成因。作为对照,亮带白云石晶体中没有大量的包裹体而显现出浅色的外观,进一步表明它是直接沉淀形成的。

斑马结构的形成是由两个密切发生的过程造成的:一是矿物交代,二是溶解和开放空间的产生^[11]。ELIP 喷发使得地层温度升高,其增温效应时间约为 $290 \sim 260\text{ Ma}$ ^[12]。在此期间川西北地区栖霞组对应的地层沉积物处于浅埋藏阶段,且位于台地边缘^[6],在侧向上对外开放。由于 ELIP 提供的异常地热对地层中的孔隙水或卤水加热,形成与外侧海水之间的温度差,从而产生密度差异,寒冷的海水就能向地层源源不断地输入 Mg^{2+} ^[6]。随着地层温度的升高,白云石化作用也会加强。此外,台地边缘滩相比较高的渗透性以及白云石交代方解石的过程中,特别是在方解石—白云石置换的早期阶段,方解石的快速溶解和白云石的缓慢沉淀同时进行的过程中导致摩尔体积的损失,从而造成孔隙度增加^[29-31],这也有利于白云石化流体的流通及白云石化作用的增强。交代和溶解原始基岩的同时产生了新的裂缝和开放空间,而且白云石化流体的饱和度越高,产生的裂缝间距就会越小^[32],形成了样品中亮带宽度大于暗带的斑马结构(图

2a)。当白云石化流体注入断层或裂缝,顺层溶解原始基岩形成开放空间,交代原始基岩形成暗带白云石。靠近开放空间的暗带白云石的结晶力大于自身的抗张强度,从而产生新的裂缝。当暗带白云石稳定后,裂缝中的富镁流体沉淀出亮带白云石。如此反复,形成了亮带白云石与暗带白云石交替出现的斑马状白云岩。

东吴运动期间,伴随着 ELIP 岩浆活动增强,岩浆或热液随着断层或裂缝向上运移且顺层流动,从而与地层中的海水混合形成白云石化流体,流体混合的结果可能会增强方解石的溶解^[33],从而进一步增加白云石化流体的流通,导致白云石化的速率和白云石化程度加强。较高的地温条件促进了白云石化流体在地层中的循环流动,从而导致鞍形白云石胶结物在斑马状白云岩的溶蚀孔洞、裂缝中沉淀充填。高温热液流体中沉淀的鞍形白云石由于结晶速度较快,有序度较低^[13]。此次研究中的鞍形白云石有序度较高(平均值 0.85),且接近化学计量($MgCO_3$ 摩尔分数平均值为 51.11%),表明鞍形白云石在快速沉淀之后经历的埋藏成岩作用使得白云石发生调整,进而更加有序^[34]。

6 结论

(1)ST18 井中斑马状白云岩暗带和亮带白云石岩石学特征差异明显。暗带由中细晶白云石组成,阴极发光呈暗红色,为交代作用形成;亮带由中粗晶及鞍形白云石组成,阴极发光呈亮红色,从流体中直接沉淀形成。

(2)暗带和亮带白云石的 $\delta^{13}C$ 值落在同时期海水 $\delta^{13}C$ 值范围内,且 $\delta^{18}O$ 值较同期海水偏负,说明白云石化流体来源于海水,且热的作用使得氧同位素发生了分馏。黄铁矿与亮带中鞍形白云石的伴生,表明亮带白云石除受到热能量影响之外,还有热液流体的加入。

(3)ST18 井斑马状白云岩的形成过程概括如下:加热的海源流体沿着断层或裂缝重复—持续脉冲运移至高孔高渗地层,并在溶蚀—交代方解石的过程中形成暗带白云石,与此同时形成开放空间;海源流体叠加热液的混入,在开放空间中依次沉淀中粗晶白云石和鞍形白云石,形成亮带;深埋藏环境下亮暗带白云石均发生调整,形成有序度较高的斑马状白云岩。

参考文献:

[1] 洪太元,程喆,许华明,等.四川盆地大中型气田形成的主控

因素及勘探对策[J].石油实验地质,2021,43(3):406-414.

HONG Taiyuan, CHENG Zhe, XU Huaming, et al. Controlling factors and countermeasures for exploring large and medium-sized gas fields in Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(3):406-414.

[2] 郭旭升,胡东风,段金宝.中国南方海相油气勘探展望[J].石油实验地质,2020,42(5):675-686.

GUO Xusheng, HU Dongfeng, DUAN Jinbao. Marine petroleum exploration in South China [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5):675-686.

[3] 金振奎,冯增昭.滇东—川西下二叠统白云岩的形成机理:玄武岩淋滤白云化[J].沉积学报,1999,17(3):383-389.

JIN Zhenkui, FENG Zengzhao. Origin of dolostones of the Lower Permian in East Yunnan—West Sichuan: dolomitization through leaching of basalts [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(3):383-389.

[4] 王丹,袁苗,段文浩,等.川西北中二叠统栖霞组白云岩成因探讨[J].石油天然气学报,2011,33(6):46-49.

WANG Dan, YUAN Miao, DUAN Wenhao, et al. The dolomite origin of Qixia Formation in Middle Permian of northwest Sichuan [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(6):46-49.

[5] 韩晓涛,鲍征宇,谢淑云.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):167-176.

HAN Xiaotao, BAO Zhengyu, XIE Shuyun. Origin and geochemical characteristics of dolomites in the Middle Permian formation, SW Sichuan Basin, China [J]. Earth Science, 2016, 41(1):167-176.

[6] DONG Yixin, CHEN Hongde, WANG Jiuyuan, et al. Thermal convection dolomitization induced by the Emeishan large igneous province [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 116:104308.

[7] 冯明友,张帆,李跃纲,等.川西地区中二叠统栖霞组优质白云岩储层特征及形成机理[J].中国科技论文,2015,10(3):280-286.

FENG Mingyou, ZHANG Fan, LI Yuegang, et al. Characteristics and formation mechanism of Qixia Formation (Middle Permian) dolomite reservoirs in western Sichuan Basin [J]. China Science-paper, 2015, 10(3):280-286.

[8] FENG Ke, XU Shenglin, CHEN Anqing, et al. Middle Permian dolomites of the SW Sichuan Basin and the role of the Emeishan large igneous province in their origin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 128:104981.

[9] DAVIES G R, SMITH L B JR. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11):1641-1690.

[10] KELKA U, KOEH D, BEAUDOIN N. Zebra pattern in rocks as a function of grain growth affected by second-phase particles [J]. Frontiers in Physics, 2015, 3:74.

[11] WALLACE M W, HOOD A V S. Zebra textures in carbonate rocks: fractures produced by the force of crystallization during mineral replacement [J]. Sedimentary Geology, 2018, 368:58-67.

[12] 朱传庆,徐明,袁玉松,等.峨眉山玄武岩喷发在四川盆地的

- 地热学响应[J].科学通报,2010,55(6):474-482.
- ZHU Chuanqing, XU Ming, YUAN Yusong, et al. Palaeogeothermal response and record of the effusing of Emeishan basalts in the Sichuan Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(10): 949-956.
- [13] 赵金, 冯明友, 沈安江, 等. 川西南中二叠统栖霞组斑马构造白云岩形成机理: 以宝兴五龙剖面为例[J]. 海相油气地质, 2020, 25(3): 223-233.
- ZHAO Jin, FENG Mingyou, SHEN Anjiang, et al. Genesis of zebra dolomite of the Middle Permian Qixia Formation in the southwestern Sichuan Basin; taking Wulong outcrop in Baoxing area as an example [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2020, 25(3): 223-233.
- [14] FENG Qianqian, QIU Nansheng, FU Xiaodong, et al. Permian geothermal units in the Sichuan Basin; implications for the thermal effect of the Emeishan mantle plume [J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 132: 105226.
- [15] GAO Ping, HE Zhiliang, LASH G G, et al. Mixed seawater and hydrothermal sources of nodular chert in Middle Permian limestone on the eastern Paleo-Tethys margin (South China) [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2020, 551: 109740.
- [16] 刘文栋, 钟大康, 尹宏, 等. 川西北栖霞组超深层白云岩储层特征及主控因素[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(2): 342-362.
- LIU Wendong, ZHONG Dakang, YIN Hong, et al. Development characteristics and main controlling factors of ultra-deep dolomite reservoirs of the Qixia Formation in the northwestern Sichuan Basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(2): 342-362.
- [17] 胡朝伟, 胡广, 张玺华, 等. 川西北地区茅口组上部黑色岩系的层位、沉积环境及生烃潜力评价[J]. 石油实验地质, 2020, 42(2): 202-214.
- HU Chaowei, HU Guang, ZHANG Xihua, et al. Sedimentary environment, hydrocarbon potential and development of black rocks in upper Maokou Formation, northwestern Sichuan [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(2): 202-214.
- [18] 魏国齐, 杨威, 朱永刚, 等. 川西地区中二叠统栖霞组沉积体系[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 442-448.
- WEI Guoqi, YANG Wei, ZHU Yonggang, et al. Depositional system of the Middle Permian Qixia Formation in the western Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(4): 442-448.
- [19] 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- HUANG Sijing. Carbonate diagenesis [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.
- [20] 刘集银, 王自友. 白云石的晶体结构特征和X-射线研究[J]. 矿物岩石, 1988, 8(1): 28-33.
- LIU Jiyin, WANG Ziyou. Crystal structure characterization and X-ray study of dolomite [J]. Mineralogy and Petrology, 1988, 8(1): 28-33.
- [21] LUMSDEN D N. Discrepancy between thin-section and X-ray estimates of dolomite in limestone [J]. Journal of Sedimentary Research, 1979, 49(2): 429-435.
- [22] KACZMAREK S E, SIBLEY D F. Direct physical evidence of dolomite recrystallization [J]. Sedimentology, 2014, 61(6): 1862-1882.
- [23] BUGGISCH W, KRAINER K, SCHAFFHAUSER M, et al. Late Carboniferous to Late Permian carbon isotope stratigraphy: a new record from post-Variscan carbonates from the southern Alps (Austria and Italy) [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 433: 174-190.
- [24] PAN Liyin, SHEN Anjiang, ZHAO Jianxin, et al. LA-ICP-MS U-Pb geochronology and clumped isotope constraints on the formation and evolution of an ancient dolomite reservoir; the Middle Permian of northwest Sichuan Basin (SW China) [J]. Sedimentary Geology, 2020, 407: 105728.
- [25] FABRICIUS I L, BORRE M K. Stylolites, porosity, depositional texture, and silicates in chalk facies sediments. Ontong Java Plateau-Gorm and Tyra fields, North Sea [J]. Sedimentology, 2007, 54(1): 183-205.
- [26] 黄思静, 李小宁, 黄可可, 等. 四川盆地西部栖霞组热液白云岩中的自生非碳酸盐矿物[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2012, 39(4): 343-352.
- HUANG Sijing, LI Xiaoning, HUANG Keke, et al. Authigenic noncarbonate minerals in hydrothermal dolomite of Middle Permian Qixia Formation in the west of Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2012, 39(4): 343-352.
- [27] BATHURST R G C. Carbonate sediments and their diagenesis [M]//Developments in sedimentology. Amsterdam: Elsevier, 1975: 658.
- [28] DICKSON J A D. Crystal growth diagrams as an aid to interpreting the fabrics of calcite aggregates [J]. Journal of Sedimentary Research, 1993, 63(1): 1-17.
- [29] PUTNIS A. Mineral replacement reactions [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2009, 70(1): 87-124.
- [30] KONDRATIUK P, TREDAK H, LADD A J C, et al. Synchronization of dissolution and precipitation fronts during infiltration-driven replacement in porous rocks [J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(7): 2244-2252.
- [31] MACHEL H G. Concepts and models of dolomitization: a critical reappraisal [M]//BRAITHWAITE C J R, RIZZI G, DARKE G. The geometry and petrogenesis of dolomite hydrocarbon reservoirs. London: Geological Society of London, 2004: 7-63.
- [32] WILTSCHKO D V, MORSE J W. Crystallization pressure versus "crack seal" as the mechanism for banded veins [J]. Geology, 2001, 29(1): 79-82.
- [33] KOESHIDAYATULLAH A, CORLETT H, STACEY J, et al. Origin and evolution of fault-controlled hydrothermal dolomitization fronts: a new insight [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 541: 116291.
- [34] 张杰, JONES B, 张建勇. 不同埋藏深度交代白云石晶体结构及其对白云岩储层研究的意义[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(3): 21-28.
- ZHANG Jie, JONES B, ZHANG Jianyong. Crystal structure of replacement dolomite with different buried depths and its significance to study of dolomite reservoir [J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(3): 21-28.