

四川盆地西部雷口坡组非热液成因鞍形白云石的发现及意义

李国蓉¹, 刘正中², 谢子潇¹, 段勇民², 何 赛¹, 邓美洲², 王雨辰¹, 李 勇², 吴章志¹

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 中国石化 西南油气分公司, 四川 成都 610041)

摘要:鞍形白云石通常由热液作用形成,四川盆地西部雷口坡组广泛发育的鞍形白云石也被许多学者归为热液作用成因,并由此将雷口坡组白云岩储层归为热液成因储层。为了进一步认识这些鞍形白云石的成因,并为储层研究提供指引,本文通过对四川盆地西部雷口坡组鞍形白云石的岩石学及地球化学特征分析,较深入地开展了雷口坡组鞍形白云石研究。研究指出区内雷口坡组存在两种成因类型的鞍形白云石;构造裂缝内的鞍形白云石在阴极射线下发亮桔红色光或不发光,氧同位素值相对较高、富集稀土元素、并具负Eu异常、锶-钾-铁-锰含量较高,明显不同于围岩,可能是深部与中酸性岩浆活动有关的岩浆期后热液作用的产物;灰岩中的鞍形白云石斑块、白云岩溶蚀缝孔洞内鞍形白云石沉淀物在阴极射线下发玫瑰红色光,氧同位素值相对较低、贫稀土元素、缺乏Eu异常、锶-钾-铁-锰含量较低,与白云岩围岩极其相似,代表了白云石化流体及物质来源于地层本身,是非热液成因的鞍形白云石,是中-深埋藏条件下,白云岩地层内部流体白云石化作用的产物。区内雷口坡组热液成因鞍形白云石发育分布有限,广泛发育分布的是非热液成因鞍形白云石,指示了雷口坡组储层并非热液作用成因;埋藏条件下,地层流体及热液流体活动较弱,大量的有效储集空间得以保存下来。

关键词:非热液成因;储集意义;鞍形白云石;雷口坡组;四川盆地西部

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Discovery of non-hydrothermal saddle-shaped dolomite in Leikoupo Formation, Western Sichuan Basin and its significance

Li Guorong¹, Liu Zhengzhong², Xie Zixiao¹, Duan Yongmin², He Sai¹, Deng Meizhou²,

Wang Yuchen¹, Li Yong², Wu Zhangzhi¹

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. Southwest Oil and Gas Branch of SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Since saddle-shaped dolomites are usually formed by hydrothermal fluid, multiple scholars have considered the saddle-shaped dolomite in the Leikoupo Formation, Western Sichuan Basin, as hydrothermal origin and ascribed the reservoir therein as a product of hydrothermal process. The study made an in-depth analysis of the petrology and geochemistry of saddle-shaped dolomite in the area, in order to further identify the origin of the dolomite and the genetic mechanism of the dolomite reservoir. Two origin types of saddle-shaped dolomite were identified — the hydrothermal saddle-shaped dolomite and the non-hydrothermal one. The former developed inside tectonic fractures emits bright orange red light or is non-luminant under cathodoluminescence, featuring relatively high content of $\delta^{18}\text{O}$ and Sr-K-Fe-Mn elements, rich rare-earth elements, and negative-Eu abnormality. It's quite different from the matrix rocks, and may be a product of post-magmatic hydrothermal processes following intermediate to acidic magma activities in depth. However, the latter is a product of the dolomitization of medium-to-deep fluids inside the dolomite reservoir. Its saddle-shaped dolomite plaques in limestone and the saddle-shaped dolomite precipitates in dissolved pores or cavities in dolomite emit rose-bengal light under cathodoluminescence, featuring relatively lower content of $\delta^{18}\text{O}$ and Sr-K-Fe-Mn elements, as well as deficiency in rare-earth element and Eu abnormality. They are quite similar to the surrounding dolomites,

收稿日期:2019-08-30;修订日期:2019-11-19。

第一作者简介:李国蓉(1964—),男,教授,储层地质学与储层地球化学。E-mail:liguorong@cdut.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05005-001);国家自然科学基金项目(41272150)。

indicating that dolomitization fluids and substance have originated from within the same reservoir. The fact of limited distribution of the saddle-shaped dolomite of hydrothermal origin and wide distribution of the saddle-shaped dolomite of non-hydrothermal origin in the Leikoupo Formation, indicates that the Leikoupo reservoir is not of hydrothermal origin. The relatively subdued activities of formation and hydrothermal fluids in burial have led to good preservation of effective reservoir space.

Key words: non-hydrothermal origin, reserving significance, saddle-shaped dolomite, Leikoupo Formation, Western Sichuan Basin

法国博物学家 Deodat de Dolomieu (1791) 首次描述了白云石和白云岩。Radke and Mathis (1980) 对鞍形白云石进行了描述, 认为鞍形白云石是一种乳白色、灰色或棕色的亮晶白云石晶体, 具有独特的锥面、弯曲晶面和晶格、波状消光、珍珠光泽、丰富的流体包体和晶内微量元素成分变化范围大等特点, 鞍形晶体形态和弯曲晶面反映了原子沉淀的高速度和附着晶体生长模式, 正交偏光镜下矿物的波状消光与晶格弯曲有关, 而反射光下不透明-半透明乳白色特征由大量流体包裹体引起^[1]。随后, 大量的学者认为鞍形白云石是热液作用及热液白云石化的标志^[2-17]; 少数学者提及鞍形白云石也可非热液成因^[18-19]。

沈安江、周进高等 (2008) 的研究提及四川盆地雷口坡组白云岩储层中见少量鞍形白云石, 主要充填于埋藏期裂缝或溶孔中, 对孔隙的影响不大^[20]。汪华 (2009)、陈昭国 (2011)、秦川 (2012)、余永强 (2017)、赵聪 (2019) 等在他们的博、硕士学位论文研究中, 在龙深 1 井、中 46 井、青林 1 井、涞 1 井、磨 16、22 井、女深 2 井、遂 47 井、营 21 井、川峰 188 井、羊深 1 井、鸭深 1 井等多口井的雷口坡组中发现了鞍形白云石, 可存在于溶蚀孔洞和裂缝中, 认为它是热液作用的产物, 并由此将相关储层解释为热液白云岩优质储层^[21-29]。彭靖淞、刘树根等 (2014) 的研究发现龙门山前缘雷口坡组储层中鞍形白云石广泛发育, 并认为鞍形白云石与连晶硬石膏/裂缝中多晶硬石膏+萤石+天青石+自生石英构成热液矿物组合, 或者与二叠纪-中三叠世的“峨眉地裂运动”相关的热液活动有关, 或者部分与深埋藏过程中的 TSR 作用有关^[30]。

我们对四川盆地西部雷口坡组的研究中, 发现除了热液成因鞍形白云石外, 还广泛发育非热液成因鞍形白云石。本文依据它们两者岩石学及地球化学特征的比较分析, 进一步认识了非热液成因鞍形白云石的地质地球化学特征和形成机制。很显然, 正确识别出非热液成因鞍形白云石, 对于正确把握相关储层的成因机制和储层发育规律具有重要意义。

1 地质背景

研究区位于四川盆地西部, 构造上, 由东向西, 包括了广汉-中江斜坡带、新场隆起带、文星-绵阳斜坡带、金马-鸭子河-安县隆起带, 进一步向西则为龙门山构造带; 中三叠统雷口坡组是该区域极具勘探开发潜力的层系, 目前已有羊深 1、彭州 1、鸭深 1、龙深 1、孝深 1、川科 1、都深 1、新深 1 和潼深 1 等一系列针对雷口坡组的钻井, 它们在雷口坡组获得高产工业性天然气流或良好油气显示, 是本论文研究的重点钻井 (图 1), 此外, 本论文研究中还涉及了龙门山区的绵竹汉旺、江油黄连桥-北川香水、江油石元乡马鞍塘等野外露头剖面。

雷口坡组沉积时期, 四川盆地西部处于扬子陆块西缘, 扬子陆块经过志留纪末加里东运动后与华夏板块拼合在一起形成华南陆块, 其南、西、北三面被特提斯洋所包围, 东南缘为古西太平洋, 特提斯洋、古西太平洋的发展演化影响区内雷口坡组的沉积作用, 尤其是特提斯洋的影响更甚^[31]。在扬子陆块内, 包括四川盆地在内的中上扬子区域, 为一个大型陆表海台地, 以局限台地相带发育为特征; 上扬子内部泸州、开江等一些隆起使得陆表海内部地形凹凸不平, 它们与边缘隆起发育导致的多海侵入口的联合作用, 致陆表海台地内部沉积环境和沉积相复杂多变。这一时期既是古特提斯洋的闭合阶段, 又是中特提斯洋开始发育的阶段, 并直接导致了龙门山以西甘孜-理塘洋的发育; 与聚敛和离散有关的构造作用、岩浆作用较为发育, 并由此深部元素通过断裂及火山作用进入深盆地内; 进而, 通过海平面上升和海侵作用, 这些富含了深部元素的深盆地海水就可侵入扬子陆块浅水区; 通过广泛、强烈的蒸发而浓缩、富集, 为早中三叠世扬子陆块浅水区蒸发岩的广泛发育提供了物质基础^[32-40]。而这一时期极端发育的巨型季风气候机制, 造就了包括研究区在内的整个东特提斯洋区域极度干旱、炎热, 为蒸发岩的广泛发育创造了条件, 也为雷口坡组微生物碳酸盐岩的优势发育创造了条件^[41-43]。

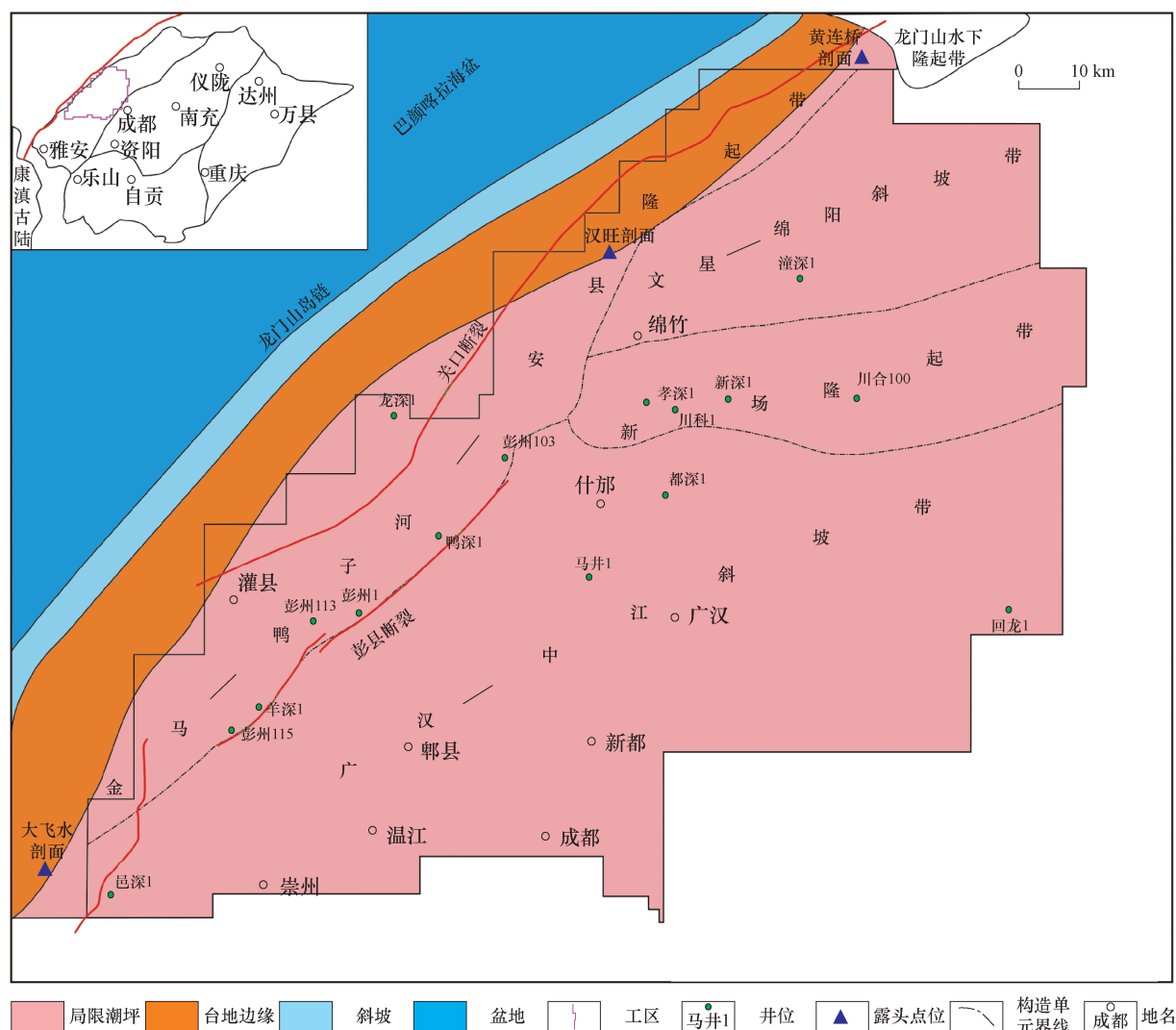


图1 四川盆地西部构造沉积相带及重点研究钻井剖面位置

Fig. 1 A diagram showing the tectonic-sedimentary facies zones and the profile position of key drilling in the Western Sichuan Basin

中、晚三叠世之间,包括四川盆地西部在内的广大区域发生了一次区域性不整合^[44-51],致雷口坡组遭受较强烈的大气水岩溶改造。晚三叠世以来,区内处于川西前陆盆地与龙门山造山带的接触部位,由于特提斯洋的开启闭合、印度板块向欧亚板块的碰撞带来的断裂多期次活动、多期次隆升成山、多期次盆地沉降对研究区雷口坡组的改造发挥作用;有关岩浆活动主要在印支期第二幕、燕山运动第I-III幕期间发育,喜马拉雅期有零星发育分布^[52];埋藏剥蚀历史表现为:古新世之前,表现为持续埋藏加深,古新世以来,表现为抬升变浅^[53-55]。

2 非热液成因鞍形白云石及其矿物学、岩石学特征

四川盆地西部雷口坡组发育多种类型白云石,包括粉-微晶白云石、粉-细晶它形脏白云石、粉-细晶

自形白云石、鞍形白云石等。鞍形白云石以晶体较大,可达中-巨晶,晶形不好、晶面扭曲、可显镰刀状形态,正交光下具波状消光为特征(图2)。根据产出状态,鞍形白云石进一步分为3种;其一是灰岩中交代方解石的鞍形白云石斑块,可交代灰岩沉积组构、成岩缝洞方解石、去膏化方解石、构造裂缝方解石(图2a,d);其二是白云岩中溶蚀缝孔洞内沉淀的鞍形白云石(图2b,e);其三是构造裂缝内沉淀的鞍形白云石,可受到缝合线及构造角砾化改造(图2c,f)。统计结果,白云岩中溶蚀缝孔洞内鞍形白云石出现频率高,为19.74%;灰岩中鞍形白云石斑块的出现率较高,为7.37%;裂缝内鞍形白云石出现频率低,为4.63%。

阴极发光分析,这三种产状的鞍形白云石特征有别;灰岩中鞍形白云石斑块往往发玫瑰红色光,而灰岩围岩近于不发光,两者反差较大(图3a,d);白云岩中溶蚀缝孔洞内鞍形白云石发暗玫瑰红色光,与白云岩围

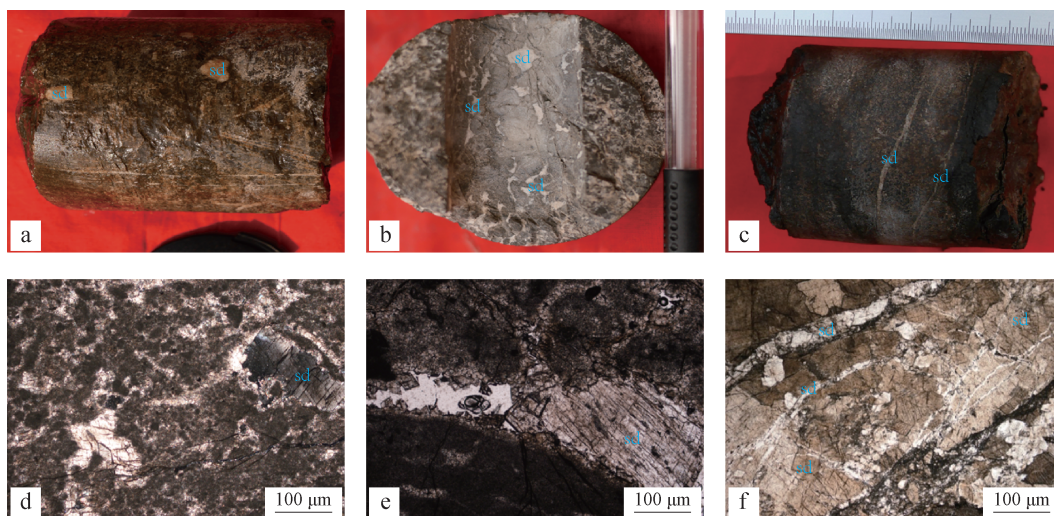


图 2 四川盆地西部雷口坡组鞍形白云石(sd)

Fig. 2 The saddle-shaped dolomite(sd) in the Leikoupo Formation, Western Sichuan Basin

a. 灰岩中交代成因鞍形白云石斑点, 羊深 1 井, 雷四段, 埋深 6 124.33m; b. 白云岩中溶蚀缝洞鞍形白云石及方解石充填, 羊深 1 井, 雷四段, 埋深 6 210.10m; c. 膏云岩中构造裂缝鞍形白云石及硬石膏充填, 潼深 1 井, 雷四段, 埋深 5 849.47m; d. 灰岩中交代成因鞍形白云石斑块, 正交光下波状消光特征清楚, 彭州 1 井, 雷四段, 埋深 5 765.10m; e. 白云岩中溶蚀缝洞内鞍形白云石部分充填, 鸭深 1 井, 雷四段, 埋深 5 786.91m; f. 膏云岩中多期裂缝内鞍形白云石充填, 龙深 1 井, 雷三段, 埋深 6 296.17m。

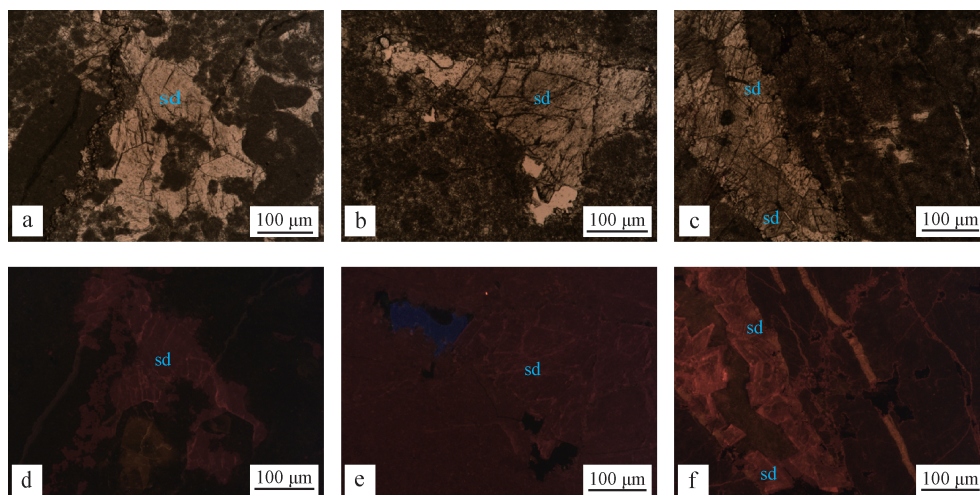


图 3 四川盆地西部雷口坡组鞍形白云石(sd)的阴极发光特征

Fig. 3 Cathodoluminescence characteristics of saddle-shaped dolomite(sd) in the Leikoupo Formation, Western Sichuan Basin

a, d. 灰岩中的交代成因鞍形白云石斑块发玫瑰红色光, 灰岩围岩近于不发光, 羊深 1 井, 雷四段, 埋深 6 121.94 m, a 图为(-), d 图为(cl), 5 ×; b, e. 白云岩溶蚀孔洞内沉淀成因鞍形白云石发玫瑰红色光, 与白云岩围岩发光颜色相似, 羊深 1 井, 雷四段, 埋深 6 217.15 m, b 图为(-), e 图为(cl), 5 ×; c, f. 构造裂缝内鞍形白云石发亮桔红色光, 白云岩围岩发玫瑰红色光, 潼深 1 井, 雷四段, 埋深 5 849.79 m, c 图为(-), f 图为(cl), 5 ×

岩及溶蚀缝孔洞内粉-细晶自形白云石发光近于一致(图 3b, e); 构造裂缝内鞍形白云石发亮桔红色光(图 3c, f), 与前面几者明显不同。分析认为, 灰岩中鞍形白云石斑块、白云岩中溶蚀缝孔洞内鞍形白云石的阴极发光具有相似性, 并与白云岩围岩及埋藏成因粉-细晶自形白云石具有相似性, 表明这些白云石具有大致相似的 Fe 和 Mn 含量及 Mn/Fe 比值, 进而暗示了它们形成于相似的条件和流体

组成, 成岩流体为雷口坡组地层内部来源流体, 它们可能属于非热液成因鞍形白云石; 而构造裂缝内鞍形白云石阴极发光特征明显不同于白云岩围岩, 不同于灰岩中鞍形白云石斑块, 不同于白云岩溶蚀缝孔洞内鞍形白云石, 不同于前述交代成因粉-细晶自形白云石和溶蚀缝孔洞内粉-细晶自形白云石, 揭示了此类白云石具有独特的 Fe 和 Mn 含量及 Mn/Fe 比值, 暗示了其不仅仅是埋藏成因, 存在外

部流体进入参与作用的可能性,可能属于热液成因鞍形白云石。这与后面的微量元素分析结果相吻合。

3 非热液成因鞍形白云石的地球化学特征及白云石化流体性质

3.1 碳、氧稳定同位素特征与成岩流体性质指示

碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要受到碳来源的控制,有机质氧化产生的轻 CO_2 的加入会致使碳酸盐矿物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏负;若没有外来碳源的加入, $\delta^{13}\text{C}$ 值则相对于原岩变化很小。 $\delta^{18}\text{O}$ 值则主要受控于成岩流体性质及温度和盐度,因此可以凭借其特征分析成岩时的古盐度及古温度、流体的性质及来源,进而也可以指示岩样成岩蚀变强度及成岩环境。

表1是区内雷口坡组不同类型白云石的碳、氧稳定同位素分析结果,图4是区内雷口坡组鞍形白云石及相关类型白云石的碳、氧稳定同位素分布,可见不同产状的鞍形白云石的碳、氧稳定同位素组成差异明显。交代成因的鞍形白云石斑块具有 $\delta^{13}\text{C}$ 值正值—负值变化、 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 值为 $-1.33\text{‰} \sim 2.57\text{‰}$, 平均值为 0.85‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ (PDB) 值相对较低,为 $-5.52\text{‰} \sim -7.87\text{‰}$, 平均值为 -6.64‰ 。缝孔洞内鞍形白云石具有 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 低负值—正值变化,为 $-0.72\text{‰} \sim 2.57\text{‰}$, 平均值为 0.057‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ (PDB) 值相对较低,为 $-5.22\text{‰} \sim -7.56\text{‰}$, 平均值为 -6.44‰ 。构造裂缝内脏鞍形白云石具有 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 值为正值,为 $0.38\text{‰} \sim 2.69\text{‰}$, 平均值为 1.14‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ (PDB) 值相对较高,为 $-1.97\text{‰} \sim -5.35\text{‰}$, 平均值为 -4.19‰ 。

表1 四川盆地西部雷口坡组白云石碳、氧稳定同位素分析结果统计

Table 1 Statistics on the analysis of carbon and oxygen stable isotopes of the dolomite in the Leikoupo Formation, Western Sichuan Basin

序号	井号	层位	产状描述	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)/‰	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)/‰	备注
1	羊深1	雷四下储层段	微晶云岩	2.21	0.72	微晶白云石
2	羊深1	雷四下储层段	粉—微晶云岩	2.61	-1.63	微晶白云石
3	新深1	雷四段	微晶云岩	2.65	-0.64	微晶白云石
4	龙深1	雷三段	微晶云岩	0.11	-0.89	微晶白云石
5	孝深1	雷四上储层段	微晶云岩	0.94	0.22	微晶白云石
6	孝深1	雷四上储层段	微晶云岩	0.65	0.19	微晶白云石
7	孝深1	雷四上储层段	微晶云岩	1.89	-1.05	微晶白云石
8	彭州103	雷四上储层段	粉—微晶云岩	1.02	-0.31	微晶白云石
9	彭州115	雷四上储层段	粉—微晶云岩	1.96	0.44	微晶白云石
10	彭州115	雷四上储层段	粉—微晶云岩	1.64	0.51	微晶白云石
11	彭州115	雷四上储层段	粉—微晶云岩	1.83	0.17	微晶白云石
12	邑深1	雷四上储层段	微晶云岩	1.57	-0.18	微晶白云石
13	羊深1	雷四下储层段	粉—细晶自形白云石呈层	1.56	-5.74	粉—细晶自形白云石
14	鸭深1	雷四下储层段	粉—细晶自形白云石密集	2.39	-6.94	粉—细晶自形白云石
15	鸭深1	雷四上储层段	微—粉晶自形白云石呈层	1.96	-6.86	粉—细晶自形白云石
16	彭州1	雷四上储层段	交代成因鞍形白云石斑块	2.57	-5.52	交代成因鞍形白云石
17	鸭深1	雷四下储层段	交代成因鞍形白云石斑块	-1.33	-6.53	交代成因鞍形白云石
18	彭州103	雷四下储层段	交代成因鞍形白云石斑块	1.30	-7.87	交代成因鞍形白云石
19	羊深1	雷四下储层段	孔洞内鞍形白云石	0.34	-5.22	溶蚀孔洞内鞍形白云石
20	彭州1	雷四下储层段	孔洞内鞍形白云石	2.57	-5.28	溶蚀孔洞内鞍形白云石
21	鸭深1	雷四下储层段	缝洞内鞍形白云石	-0.52	-7.56	溶蚀孔洞内鞍形白云石
22	鸭深1	雷四下储层段	孔洞内鞍形白云石	-0.62	-6.41	溶蚀孔洞内鞍形白云石
23	鸭深1	雷四下储层段	孔洞内鞍形白云石	-0.72	-6.65	溶蚀孔洞内鞍形白云石
24	鸭深1	雷四下储层段	孔洞内鞍形白云石	-0.71	-7.50	溶蚀孔洞内鞍形白云石
25	新深1	雷四段	构造裂缝内脏鞍形白云石	2.69	-1.97	构造裂缝内鞍形白云石
26	彭州115	雷四段	构造裂缝内鞍形白云石	1.45	-3.91	构造裂缝内鞍形白云石
27	龙深1	雷三段	构造裂缝内脏鞍形白云石	1.53	-4.06	构造裂缝内鞍形白云石
28	龙深1	雷三段	构造裂缝内脏鞍形白云石	1.51	-4.21	构造裂缝内鞍形白云石
29	龙深1	雷三段	构造裂缝内脏鞍形白云石	0.42	-5.24	构造裂缝内鞍形白云石
30	龙深1	雷三段	构造裂缝内脏鞍形白云石	0.53	-4.23	构造裂缝内鞍形白云石
31	龙深1	雷三段	构造裂缝内脏鞍形白云石	0.57	-5.35	构造裂缝内鞍形白云石
32	龙深1	雷三段	构造裂缝内脏鞍形白云石	0.38	-4.58	构造裂缝内鞍形白云石

分析认为,交代成因鞍形白云石斑块、缝孔洞内鞍形白云石沉淀物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与微晶白云石、粉-细晶自形白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较为接近,指示了成岩流体为早-中三叠世蒸发海水来源地层水; $\delta^{18}\text{O}$ 值相对较低,可能是相对较高的形成温度的反映。进一步,结合此类白云石包裹体均一化温度平均值为 147.65°C ,依据 $10^3 \ln \alpha = 3.14 \times 10^6 / t^2 - 2.0$ ($\alpha = [1\ 000 + \delta^{18}\text{O}(\text{白云石, SMOW})] / [1\ 000 + \delta^{18}\text{O}(\text{水, SMOW})]$),恢复得到白云石化流体的 $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW) 值为 $6.64\text{‰} \sim 9.01\text{‰}$,与前人测得的三叠系嘉陵江组-雷口坡组一段的碳酸盐岩地层水 $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW) 值 ($2\text{‰} \sim 9\text{‰}$)^[50] 较为接近(图5),可以

认为交代成因鞍形白云石斑块、孔洞内鞍形白云石的成岩流体为雷口坡组沉积期干旱高盐度海水演化而来的地层卤水,也由此揭示了此类鞍形白云石的非热液成因。

构造裂缝鞍形白云石的碳、氧稳定同位素组成与交代成因鞍形白云石、缝孔洞内鞍形白云石存在较大差异,意味着它们的成因机制具有较大差异。构造裂缝内鞍形白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值反而较浅埋藏成因粉-细晶自形白云石高,则表明早-中三叠世蒸发海水来源地层水难以通过进一步埋藏加深及温度升高形成此类裂缝鞍形白云石,此类鞍形白云石的形成流体是地层外部流体,是深部热液流体,流体本身 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高。

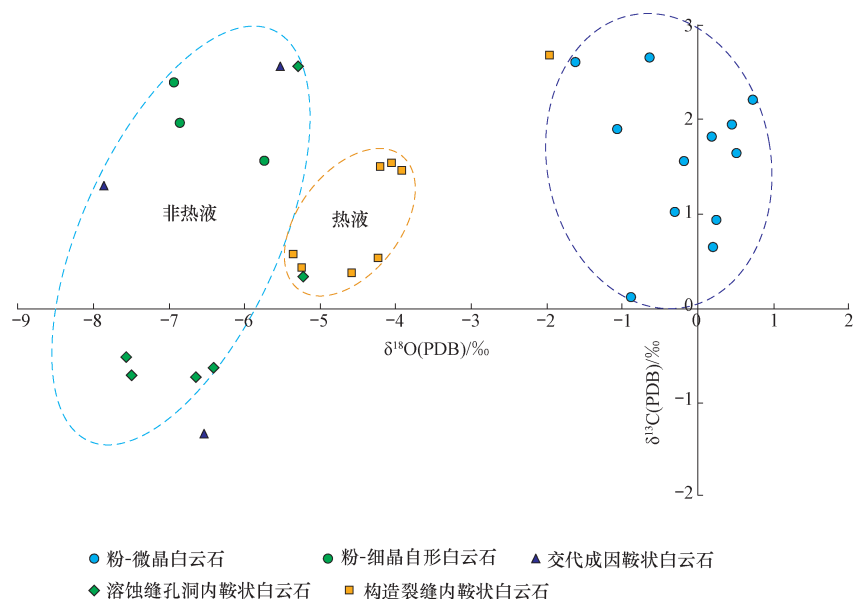


图4 四川盆地西部雷口坡组鞍形白云石碳、氧稳定同位素分布

Fig. 4 The distribution of carbon and oxygen stable isotopes of the saddle-shaped dolomite in the Leikoupo Formation, Western Sichuan Basin

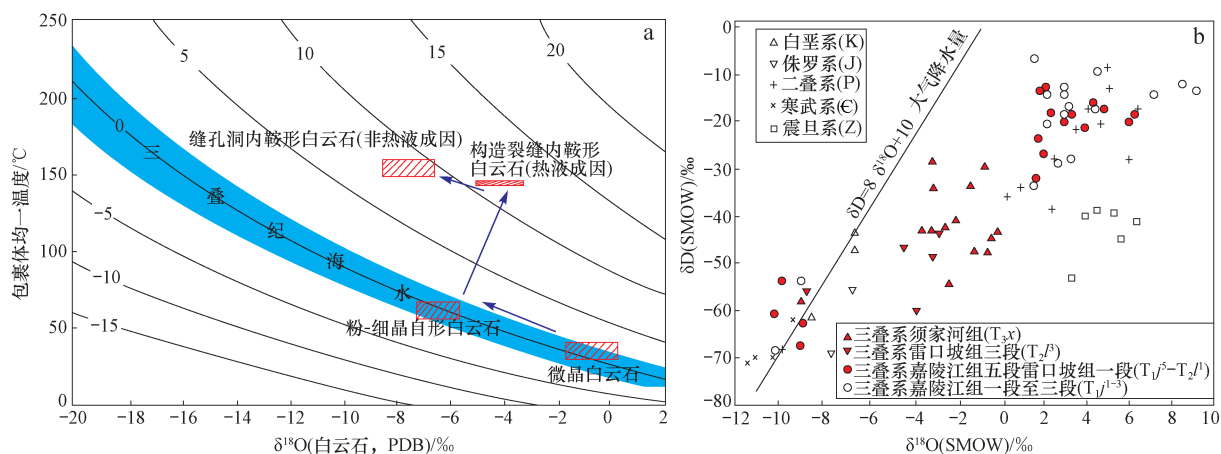


图5 四川盆地西部雷口坡组白云石化流体氧同位素组成恢复(a)与不同地层卤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值^[30]比较(b)

Fig. 5 The reconstruction of oxygen isotope composition of dolomite fluids in the Leikoupo Formation(a), and comparison of $\delta^{18}\text{O}$ values^[30] of brine in various formations(b), Western Sichuan Basin

进一步,结合裂缝内鞍形白云石的包裹体均一化温度为 142.85 °C,恢复得到沉淀白云石流体的 $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW) 值为 8.50‰ ~ 11.93‰ (图 6), 也表明此类流体不是雷口坡组沉积期干旱、高盐度海水演化而来的地层卤水,而可能是与中酸性岩浆活动有关的岩浆期后热液。

由此,结合构造裂缝内鞍形白云石可受到缝合线及构造角砾化切割改造,加之包裹体均一化温度不是太高,考虑地质背景演化,可以认为测试样品构造裂缝鞍形白云石的形成可能与印支二幕—燕山二幕期间岩浆活动相关的热液作用有关;这一时期,雷口坡组上覆沉积物厚度尚较小,地层温度在 70 ~ 110 °C 范围^[47-48],与岩浆活动相关的热液进入导致成岩流体温度升至 140 °C 左右。而交代成因鞍形白云石斑块、缝孔洞内鞍形白云石则是在燕山二幕之后不断加深的埋藏深度和地层温度中形成的。

3.2 稀土元素组成特征与成岩流体性质指示

元素周期表中原子序数为 57 ~ 71 的 15 个元素,加上化学性质相近的钪统称为稀土元素;岩石或矿物中稀土元素的含量受控于岩石或矿物的成分组成和形成岩石的氧化还原状态;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。

图 6 是区内雷口坡组鞍形白云石的稀土元素组成图,可见交代成因鞍形白云石斑块的稀土元素组

成与正常海相灰岩、微晶灰岩极其相似,孔洞内鞍形白云石的稀土元素组成还缺乏 Ce 异常、缺乏 Eu 异常,与前述微晶云岩的稀土元素组成特征极其相似,揭示了这些鞍形白云石的流体为沉积期干旱、高盐度海水来源地层卤水,揭示了其非热液成因。构造裂缝内鞍形白云石相对较正常海相灰岩或微晶灰岩富集稀土元素,具有明显的 Eu 负异常,明显不同于前述的微晶白云石、微—粉晶它形脏白云石、粉—细晶自形白云石、交代成因鞍形白云石斑块以及孔洞内鞍形白云石的稀土元素组成,揭示了沉淀构造裂缝内鞍形白云石的流体既不是沉积期海水,也不是沉积期海水来源的地层卤水,而是来源于地层外部或深部的流体,结合富集稀土元素及 Eu 负异常特征,可能暗示了是与中酸性岩浆期后活动有关的深部热液。

图 7 是区内雷口坡组各类白云石的 $\delta\text{Eu} - \delta\text{Ce}$ 交汇图,可见微晶灰岩、微晶白云石、微—粉晶它形脏白云石、粉—细晶自形白云石、交代成因鞍形白云石斑块、孔洞内鞍形白云石都投点落入了 Eu 正异常、Ce 负异常的区域,指明了形成它们的流体为中三叠世雷口坡组沉积时期的干旱高盐度海水、沉积时期干旱高盐度海水来源并演化而来的地层卤水。而构造裂缝内鞍形白云石投点落入了 Ce 缺乏异常、Eu 负异常的区域,也指示了沉淀构造裂缝鞍形白云石的流体不同于前面的各类白云石,不是中三叠世雷口坡组沉积时期的干旱高盐度海水、沉积时期干旱高盐度海水来源并演化而来的地层卤水,而是地层外部或深部来源的流体,与中酸性岩浆期后活动有关的深部流体。

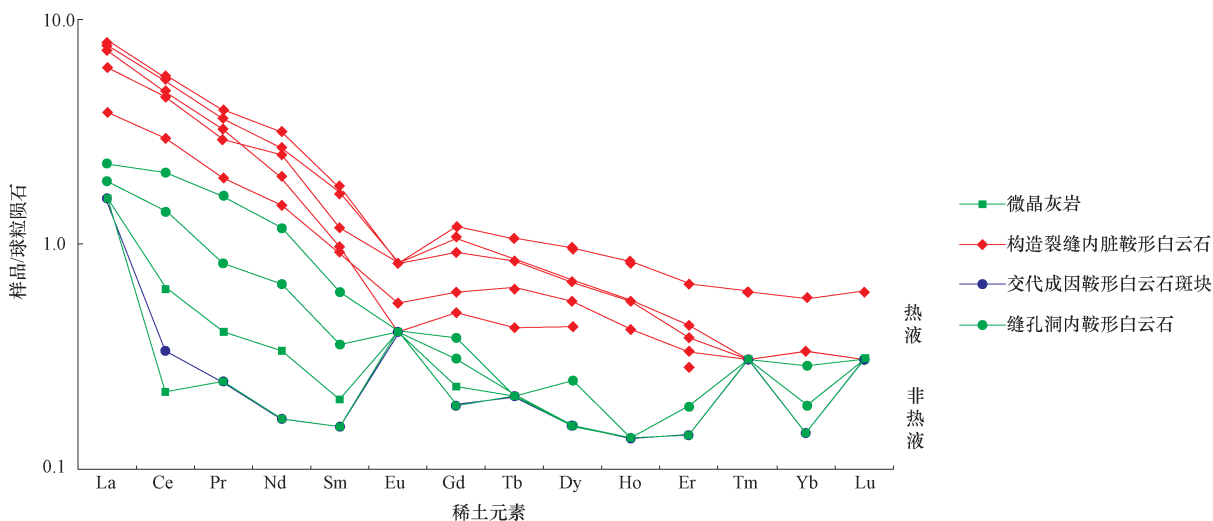
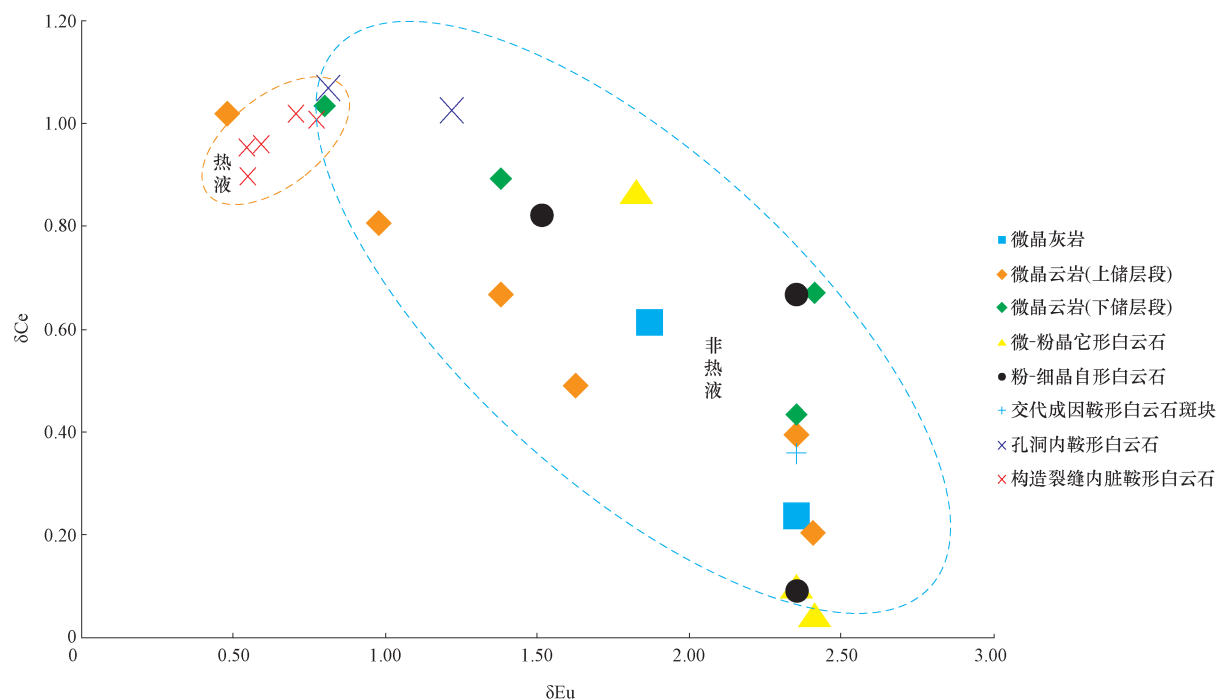


图 6 四川盆地西部雷口坡组鞍形白云石稀土元素组成

Fig. 6 Rare-earth element compositions of the saddle-shaped dolomite in the Leikoupo Formation, Western Sichuan Basin

图 7 四川盆地西部雷口坡组白云石 $\delta\text{Eu} - \delta\text{Ce}$ 交汇图Fig. 7 The cross plot of $\delta\text{Eu} - \delta\text{Ce}$ of the dolomite in the Leikoupo Formation, Western Sichuan Basin

3.3 微量元素组成特征与成岩流体性质指示

微量元素是指不作为体系中任何相的主要组分(化学计算)存在的元素。在碳酸盐岩成岩过程中,元素迁移的总体趋势是 Sr, Na 和 Mg 的丢失和 Zn, Fe 和 Mn 的获取,海水及派生流体中 Sr 是最为重要的示踪元素,而大气淡水环境中 Mn 是重要的示踪元素,它们的含量能反映成岩环境的开放程度,高 Sr 低 Mn 为相对封闭的成岩环境,高 Mn 低 Sr 为相对开放的成岩环境。Mn/Sr 比值大小能反映样品成岩蚀变性及其对海水代表性,其比值越低对海水代表性越好,样品经历的成岩蚀变越弱,比值越高对海水代表性越差,样品经历的成岩蚀变越强。本次研究白云石的微量元素含量通过 ICP-MAS、电子探针分析等两种方式获得。

3.3.1 ICP-MAS 分析白云石微量元素含量

ICP-MAS 分析结果,不同类型鞍形白云石的微量元素组成有差异(图 8);交代及孔洞内鞍形白云石具有 K, Na 和 Sr 含量相对较高, Mn 和 Fe 含量均低的特征;构造裂缝内鞍形白云石具有 K 和 Fe 含量低, Na 和 Sr 含量高, Mn 含量较高的特征。

分析认为,交代成因及孔洞内鞍形白云石的 K, Na 和 Sr 含量相对较高则可能是上述 3 个元素的分配系数小于 1, 导致流体中 K, Na 和 Sr 浓度不断增

高,从而沉淀鞍形白云石的自然结果,由此,推知沉淀此类鞍形白云石的流体与形成微晶白云石、微-粉晶它形白云石、粉-细晶自形白云石的流体具有相似性,为干旱高盐度海水演化而来。而构造裂缝内鞍形白云石具有 K 和 Fe 含量低, Na 和 Sr 含量高, Mn 含量较高的特征,明显不同于孔洞内鞍形白云石,其成岩流体不是高盐度海水自然演化而来,而可能有外部或深部流体的加入。

3.3.2 电子探针分析白云石微量元素含量

图 9 是电子探针分析获得的区内雷口坡组白云石微量元素含量,交代成因的鞍形白云石斑块具有 K_2O , Na_2O , SrO 和 MnO 含量低, FeO 含量较高的特征。孔洞内鞍形白云石亦具有 K_2O , Na_2O , SrO 和 MnO 含量低, FeO 含量较高的特征。构造裂缝内鞍形白云石分为两种情况,其一是表现为 K_2O , Na_2O , SrO , MnO 和 FeO 含量均低的特征;其二是以龙深 1 井第 25 回次岩芯为代表,显微镜下表现为干净的粗晶鞍形白云石,阴极射线不发亮,探针分析表现为 K_2O 和 Na_2O 含量低, SrO 和 MnO 含量相对较高, FeO 含量高的特征。

显然,电子探针分析揭示,孔洞内自形白云石、交代成因鞍形白云石斑块、孔洞内鞍形白云石、部分构造裂缝内鞍形白云石的 K_2O , Na_2O , SrO , MnO 和 FeO 含量特征大体相似, MnO 和 FeO 含量及其 Mn/Fe 比值变化与这些白云石的阴极发光特征非常吻合等等,可能

揭示了它们是从相似或相同的流体中沉淀而来,或者这些白云石化流体都为干旱高盐度海水演化而来。而另一类构造裂缝鞍形白云石的电子探针分析微量元素含量特征明显不同于前面,展现出 SrO 和 MnO 含量相对较高,FeO 含量高的特征,表明白云石化流体不同于前面,不是干旱高盐度海水演化而来,而是地层外部或

深部来源,其 MnO 和 FeO 含量及其 Mn/Fe 比值变化亦与此类裂缝白云石的阴极发光特征吻合,则表明此期深部流体成因鞍形白云石与阴极射线下发亮桔红色光的裂缝鞍形白云石并非同一期热液作用,亦即研究区雷口坡组存在多期热液作用,盆缘区断裂多期次活动是热液多期次作用的诱导因素。

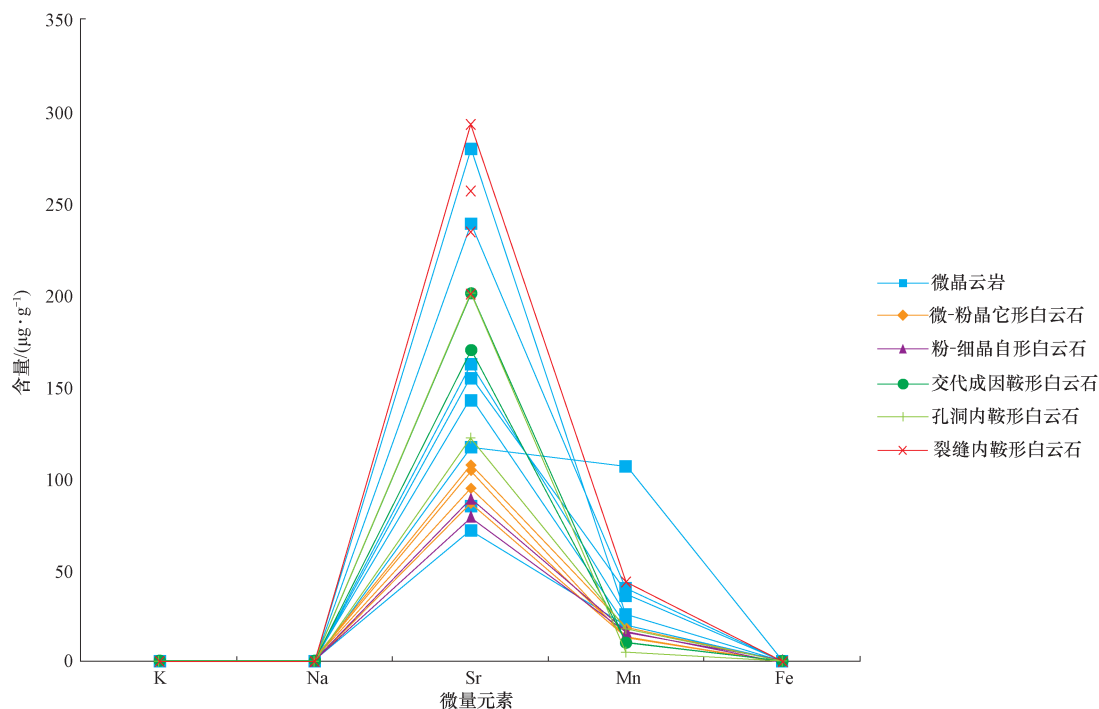


图 8 四川盆地西部雷口坡组白云石微量元素组成特征(据 ICP-MAS 分析)

Fig. 8 The trace element compositions of the dolomite in the Leikoupo Formation, Western Sichuan Basin (according to ICP-MAS analysis)

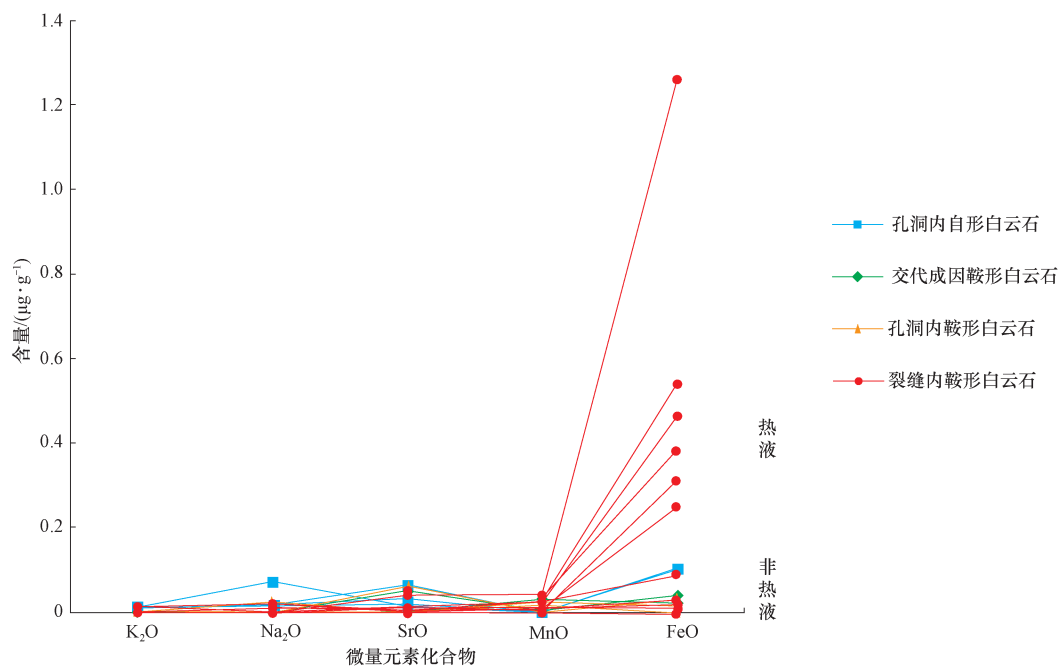


图 9 四川盆地西部雷口坡组白云石微量元素化合物特征(据电子探针分析)

Fig. 9 The trace element characteristics of the dolomite in the Leikoupo Formation, Western Sichuan Basin (according to electronic probe analysis)

4 非热液成因鞍形白云石的形成机制与模式

综上所述,可以确认四川盆地西部雷口坡组构造裂缝内鞍形白云石系热液成因鞍形白云石,灰岩中交代成因鞍形白云石及孔洞内鞍形白云石系非热液成因鞍形白云石,总结提出它们的成因模式。

4.1 中-晚成岩期构造-断裂活动热液白云石化形成裂缝内鞍形白云石

构造裂缝内鞍形白云石在区内有关钻井雷四段较为少见,但就整个雷口坡组仍较为发育,本次研究的龙深1井则非常发育,并有多期次发育充填的特点,其可受到缝合线及构造角砾化切割改造,表明其形成相对较早。其在阴极射线下可表现为发亮桔红色光或橘红色、不发光两类,其白云石有序度较高, $\delta^{13}\text{C}$ 值为正值及 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显较高,锶同位素值较高,明显较海相微晶灰岩富集稀土元素并显 Eu 负异常,ICP-MAS 分析揭示其 K 和 Fe 含量低,Na 和 Sr 含量高,Mn 含量较高的特征,阴极射线下不发光者电子探针分析表现为 K_2O 和 Na_2O 含量低,SrO 和 MnO 含量相对较高,FeO 含量高的特征,它们明显不同于雷口坡组地层中微晶白云石、粉-细晶自形白云石、交代成因鞍形白云石斑块、孔洞内的鞍形白云石,指示了白云石化流体不是雷口坡组地层内部干旱高盐度海水来源演化而来的地层卤水,而是雷口坡组地层外部流体,与深部中、酸性

岩浆期后活动有关的热液流体。结合区域内印支二幕-燕山三幕期间中、酸性岩浆活动较为活跃,本次研究认为这些热液白云石主要是印支二幕-燕山三幕断裂岩浆活动热液白云石化作用的产物,具体模式见图 10。

4.2 中-晚成岩期中-深埋藏地层卤水白云石化形成非热液成因鞍形白云石

灰岩中交代成因鞍形白云石斑块、白云岩中溶蚀缝孔洞内鞍形白云石沉淀充填是区内雷口坡组较为普遍的成岩现象,交代成因鞍形白云石可交代去膏化方解石和裂缝方解石;缝孔洞内沉淀的鞍形白云石原生包裹体均一化温度可达 $137.5 \sim 165.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,等等指明其形成于中-深埋藏条件下。其有序度较高, $\delta^{13}\text{C}$ 值为低负值及 $\delta^{18}\text{O}$ 值都低,锶同位素组成相对较高,稀土元素组成与微晶灰岩相近,并与微晶云岩极其相似,ICP-MAS 分析揭示 K,Na 和 Sr 含量相对较高,亦与微晶白云石相似,指示了其白云石化流体是与形成微晶白云石相似的高盐度流体,但又具有一些差异性,可能是雷口坡组地层内部沉积期干旱高盐度海水来源演化而来的地层卤水,还有印支期第 I 幕不整合面时期进入地层的大气水与岩石充分水岩交换反应后的地层卤水的加入。结合此类白云石发育分布与沉积环境和相的关系欠密切,在潮上带、潮坪、潮下带、泻湖、微生物礁滩、滩间等环境或微相中均可发育,但优势发育分布与三级层序高位体系域相联系,本次研究认为它们是中晚成岩期中深埋藏地层卤水白云石化的产物,具体模式见图(图 11)。

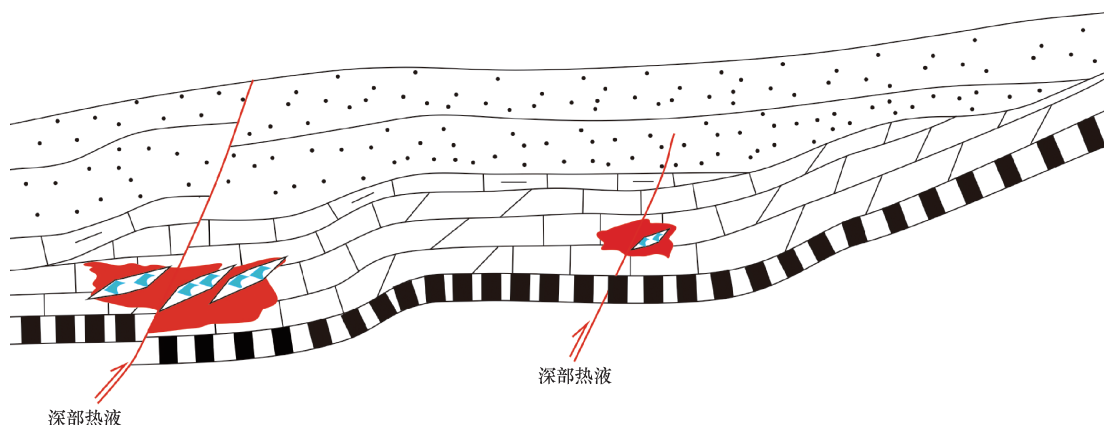


图 10 中-晚成岩期构造-断裂活动热液白云石化作用模式

Fig. 10 A schematic diagram showing the hydrothermal dolomitization of tectonic-faulting activities during the middle-to-late diagenetic period

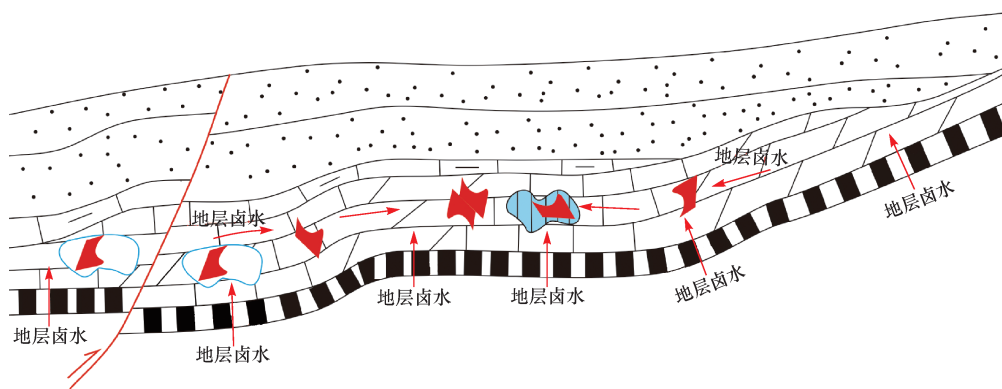


图 11 中-晚成岩期中-深埋藏地层卤水白云石化作用模式

Fig. 11 A schematic diagram of medium-to-deep buried brine dolomitization during the middle-to-late diagenetic period

5 非热液成因鞍形白云石的储层成因指示意义

由上述研究可知,尽管四川盆地西部雷口坡组鞍形白云石较为普遍,但它们主要为中深埋藏地层卤水白云石化作用形成,少量鞍形白云石为热液白云石化作用形成。虽然中晚成岩期热液白云石化可以多期次发育,与断裂及多期次断裂活动有关,主要表现为相关构造裂缝内鞍状白云石沉淀;处于盆缘断裂部位的龙深1井雷口坡组就展现出构造裂缝内热液成因鞍形白云石充填现象普遍而较强,而处于盆地内部的潼深1、新深1、鸭深1等井则表现为偶见或局部层段有发育,由此,可以认为中晚成岩期热液白云石化现象局部发育,热液流体在四川盆地西部雷口坡组的活动及其对储层的改造有限,指示了雷口坡组储层并非热液作用成因,而是另有成因。

研究表明,膏模孔及膏溶孔洞是四川盆地西部雷口坡组储层的主要储渗空间,与印支I幕不整合面有关的古表生期大气水膏溶作用是储渗空间形成的主要机制。埋藏条件下,地层流体及热液流体活动较弱,印支I幕不整合面岩溶形成的膏模孔、膏溶孔洞以及溶蚀孔隙和溶蚀孔洞被埋藏条件下的沉淀物充填破坏较弱,主要表现为局部可见少量孔洞边缘有少量粉-细晶自形白云石生长,局部可见中-粗晶鞍形白云石部分充填溶蚀孔隙和溶蚀孔洞,大量的有效空间得以保存下来。

参 考 文 献

- [1] 李群,包志伟. 热液白云岩的研究现状及展望[J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42(04): 699-717.
Li Qun, Bao Zhiwei. Research status and prospects of hydrothermal dolomite[J]. Geotectonics and Metallogensis, 2018, 42(04): 699-717.
- [2] Kretz R. Carousel model for the crystallization of saddle dolomite[J]. Journal of Sedimentary Research, 1992, 62(2): 190-195.
- [3] Al-Aasm I, Lonnee J, Clarke J, et al. Multiple fluid flow events and

the formation of saddle dolomite: examples from Middle Devonian carbonates of the Western Canada Sedimentary Basin[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2000, 38(4): 11-15.

- [4] Al-Aasm I, Lonnee J, Clarke J. Multiple fluid flow events and the formation of saddle dolomite: case studies from the Middle Devonian of the Western Canada Sedimentary Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2002, 19(3): 209-217.
- [5] Al-Aasm I. Origin and characterization of hydrothermal dolomite in the Western Canada Sedimentary Basin[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2003, 78(1): 9-15.
- [6] Luczaj J A. Evidence against the Dorag (mixing-zone) model for dolomitization along the Wisconsin arch—A case for hydrothermal diagenesis[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1719-1738.
- [7] Lonnee J, Machel H G. Pervasive dolomitization with subsequent hydrothermal alteration in the Clarke Lake gas field, Middle Devonian Slave Point Formation, British Columbia, Canada[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1739-1761.
- [8] Diehl S F, Hofstra A H, Koenig A E, et al. Hydrothermal Zebra Dolomite in the Great Basin, Nevada—Attributes and Relation to Paleozoic Stratigraphy, Tectonics, and Ore Deposits[J]. Geosphere, 2010, 6(5): 663-690.
- [9] Davies G R, Smith Jr L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1641-1690.
- [10] Luczaj J A, Harrison W B, Williams N S. Fractured hydrothermal dolomite reservoirs in the Devonian Dundee Formation of the central Michigan Basin[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1787-1801.
- [11] Jiao C L, He Z L, Xing X J, et al. Tectonic hydrothermal dolomite and its significance of reservoirs in Tarim basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 277-284.
- [12] Liu S G, Huang W M, Jansa L F, et al. Hydrothermal Dolomite in the Upper Sinian (Upper Proterozoic) Dengying Formation, East Sichuan Basin, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(5): 1466-1487.
- [13] Ogiesoba O C, Hart B S. Fault imaging in hydrothermal dolomite reservoirs: A case study[J]. Geophysics, 2009, 74(3): B71-B82.
- [14] Pearce M A, Timms N E, Hough R M, et al. Reaction mechanism for the replacement of calcite by dolomite and siderite: implications for geochemistry, microstructure and porosity evolution during hydrothermal mineralisation[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology,

- 2013,166(4):995-1009.
- [15] Swennen R, Vandeginste V, Ellam R. Genesis of zebra dolomites (Cathedral Formation; Canadian Cordillera Fold and Thrust Belt, British Columbia) [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2003, 78-79:571-577.
- [16] Smith Jr L B, Davies G R. Structurally controlled hydrothermal alteration of carbonate reservoirs: Introduction [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11):1635-1640.
- [17] Williams G E. Hydrothermal alteration of Britain's oldest palaeosols: saddle dolomite and smectite at the Lewisian-Torridon Group (early Neoproterozoic) unconformity, NW Scotland [J]. *Scottish Journal of Geology*, 2015, 51(1):63-68.
- [18] Hans G M, Jeff L. Hydrothermal dolomite—a product of poor definition and imagination [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152(3-4):163-171.
- [19] 卿海若, 陈代钊. 非热液成因的鞍形白云石: 来自加拿大萨斯喀彻温省东南部奥陶系 Yeoman 组的岩石学和地球化学证据 [J]. *沉积学报*, 2010, 28(05):980-986.
- Qing Hairuo, Chen Daizhen. Saddle-shaped dolomite with non-hydrothermal genesis: evidence of petrology and geochemistry from the Yeoman Formation of the Ordovician in southeastern Saskatchewan, Canada [J]. *Journal of Sedimentation*, 2010, 28(05):980-986.
- [20] 沈安江, 周进高, 辛勇光, 等. 四川盆地雷口坡组白云岩储层类型及成因 [J]. *海相油气地质*, 2008(04):19-28.
- Shen Anjiang, Zhou Jingao, Xin Yongguang, et al. Types and genesis of dolomite reservoirs in the Leikoupo Formation of the Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2008(04):19-28.
- [21] 曾德铭. 川西北地区中三叠统雷口坡组储层研究 [D]. 四川成都: 西南石油学院, 2005.
- Zeng Deming. Research on the reservoir of the Middle Triassic Leikoupo Formation in the northwestern Sichuan Basin [D]. *South-west Petroleum Institute*, 2005.
- [22] 汪华. 四川盆地中西部中三叠统天然气藏特征及成藏机理研究 [D]. 四川成都: 成都理工大学, 2009.
- Wang Hua. Characteristics and accumulation mechanism of the Middle Triassic natural gas reservoirs in the central and western Sichuan Basin [D]. *Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology*, 2009.
- [23] 秦川. 川中南部地区中三叠统雷口坡组储层特征 [D]. 四川成都: 成都理工大学, 2009.
- Qin Chuan. Reservoir characteristics of the Middle Triassic Leikoupo Formation in the central and southern Sichuan Basin [D]. *Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology*, 2009.
- [24] 李德星. 川中龙女寺—磨溪地区雷口坡组雷四~雷三段古岩溶储层研究 [D]. 四川成都: 成都理工大学, 2010.
- Li Dexing. Study on the paleo-karst reservoirs of the Lei 4 ~ Lei 3 Member of the Leikoupo Formation in the Moxi area of Chuansong [D]. *Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology*, 2010.
- [25] 许国明. 川西地区中古生界海相油气地质条件研究 [D]. 四川成都: 成都理工大学, 2010.
- Xu Guoming. Study on marine oil and gas geological conditions of the Middle Paleozoic in western Sichuan [D]. *Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology*, 2010.
- [26] 陈昭国. 川西地区海相碳酸盐岩储层预测研究 [D]. 四川成都: 成都理工大学, 2011.
- Chen Zhaoguo. Prediction of marine carbonate reservoirs in western Sichuan [D]. *Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology*, 2011.
- [27] 秦川. 川西坳陷中北部三叠系雷口坡组—马鞍塘组储层特征及油气勘探前景 [D]. 四川成都: 成都理工大学, 2012.
- Qin Chuan. Reservoir characteristics and oil and gas exploration prospects of the Triassic Leikoupo Formation-Maantang Formation in the central and northern Sichuan Basin [D]. *Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology*, 2012.
- [28] 林彤. 川西地区中部中三叠统雷四段储层特征 [D]. 四川成都: 成都理工大学, 2016.
- Lin Tong. Reservoir characteristics of the third member of the Middle Triassic in the central Sichuan Basin [D]. *Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology*, 2016.
- [29] 余永强. 川西中—北段中三叠统雷四~3亚段储层特征 [D]. 四川成都: 成都理工大学, 2017.
- Yu Yongqiang. Reservoir characteristics of the Middle Triassic Lei 4 ~ 3 sub-section in the middle-north segment of western Sichuan [D]. *Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology*, 2017.
- [30] 彭靖淞, 刘树根, 张长俊, 等. 龙门山前缘中三叠统雷口坡组储集层成岩作用差异性 [J]. *古地理学报*, 2014, 16(06):790-801.
- Peng Jingzhen, Liu Shugen, Zhang Changjun, et al. Diagenesis of the reservoir of the Middle Triassic Leikoupo Formation in the front of the Longmen Mountains [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(06):790-801.
- [31] 黄泽光, 高长林, 范小林. 中国中西部晚古生代—中三叠世沉积盆地原型 [J]. *石油实验地质*, 2012, 34(01):1-7.
- Huang Zeguang, Gao Changlin, Fan Xiaolin. The prototype of Late Paleozoic-Middle Triassic Sedimentary Basin in Central and Western China [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2012, 34(01):1-7.
- [32] 殷福福, 吴顺宝, 杜远生, 等. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分 [J]. *地球科学*, 1999(01):3-14.
- Yin Hongfu, Wu Shunbao, Du Yuansheng, et al. South China is part of the Tethys Island Ocean System [J]. *Earth Science*, 1999(01):3-14.
- [33] 罗建宁, 彭勇民, 潘桂棠. 东特提斯板块会聚边缘与岛弧造山作用 [J]. *岩相古地理*, 1996(03):1-15+46.
- Luo Jianning, Peng Yongmin, Pan Guizhen. The Convergent Edge and Island Arc Accretion of the East Tethys Plate [J]. *Rock Facies and Palaeogeography*, 1996(03):1-15+46.
- [34] 潘桂棠, 陈智樑, 李兴振, 等. 东特提斯多弧—盆系统演化模式 [J]. *岩相古地理*, 1996, 16(02):52-65.
- Pan Guizhen, Chen Zhiliang, Li Xingzhen, et al. Evolution model of the East Tethys multiarc basin system [J]. *Cryistry and Paleogeography*, 1996, 16(02):52-65.
- [35] 孙晓猛, 杨遵仪, 张梅生. 滇西北金沙江古特提斯造山带地层及构造演化 [J]. *长春科技大学学报*, 1999(01):21-25.
- Sun Xiaomeng, Yang Zunyi, Zhang Meisheng. Stratigraphy and tectonic evolution of the Paleotethys orogenic belt in Jinshajiang, Northwestern Guizhou [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 1999(01):21-25.
- [36] 杨丽贞, 刘融涛, 白艳萍. 广西南部钦州地区早—中三叠世火山事件——台马碎斑熔岩 [J]. *地质通报*, 2011, 30(01):95-100.
- Yang Lizhen, Liu Rongtao, Bai Yanping. The Early-Middle Triassic Volcanic Events in Qinzhou Area of Southwestern Guangxi—Taiwanese

- plaque lava[J]. Geological Notification, 2011, 30(01): 95–100.
- [37] 廖世勇, 尹福光, 王冬兵. 滇西“三江”地区临沧花岗岩基中三叠世碱长花岗岩的发现及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 3: 14.
- Liao Shiyong, Yin Fuguang, Wang Dongbing. Discovery and significance of the Middle Triassic alkali granitic granite in the Lincang granite base in the Sanjiang area, western Yunnan[J]. Journal of Rock Mineralogy, 2014, 3: 14.
- [38] 路晓平, 王仁善, 刘卫东, 等. 青海省都兰县江各早—中三叠世火山岩岩石学特征及构造环境[J]. 山东国土资源, 2014, 30(08): 16–20.
- Lu Xiaoping, Wang Renshan, Liu Weidong, et al. The petrological characteristics and tectonic setting of the volcanic rocks of the Early-Middle Triassic in Dulan County, Qinghai Province[J]. Land and Resources in Shandong, 2014, 30(08): 16–20.
- [39] 邓莉, 刘君龙, 钱玉贵, 张世华, 王天云, 于海跃. 川西地区龙门山前带侏罗系物源与沉积体系演化[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2): 380–391.
- Deng Li, Liu Junlong, Qian Yugui, Zhang Shihua, Wang Tianyun, Yu Haiyue. Provenance and sedimentary system of the Jurassic successions in the front of Longmen Mountain in western Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2): 380–391.
- [40] 魏新善, 陈娟萍, 吕奇奇, 赵小会, 贾亚妮. 白云岩与砂岩致密储集体质量的差异性[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2): 294–301.
- Wei Xinshan, Chen Juanping, Lyu Qiqi, Zhao Xiaohui, Jia Ya'ni. Quality differences between dolomite and tight sandstone reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2): 294–301.
- [41] 颜佳新. 东特提斯地区二叠—三叠纪古气候特征及其古地理意义[J]. 地球科学, 1999(01): 15–22.
- Yan Jiaxin. The Paleoclimate Characteristics of the Permian-Triassic in the Eastern Tethys and Its Paleogeographic Significance[J]. Earth Science, 1999(01): 15–22.
- [42] 颜佳新, 赵坤. 二叠—三叠纪东特提斯地区古地理、古气候和古海洋演化与地球表层多圈层事件耦合[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2002(09): 751–759.
- Yan Jiaxin, Zhao Kun. Coupling of paleogeography, paleoclimate and paleo-ocean evolution of the Permian-Triassic East Tethys region with multi-layer events of the earth's surface layer[J]. Chinese Science (Series D: Earth Sciences), 2002(09): 751–759.
- [43] 陈昱林, 曾焱, 段永明, 等. 川西龙门山前雷口坡组四段白云岩储层孔隙结构特征及储层分类[J]. 石油实验地质, 2018, 40(5): 621–631.
- CHEN Yulin, ZENG Yan, DUAN Yongming, et al. Pore structure characteristics and reservoir classification of dolomite reservoirs in fourth member of Leikoupo Formation, Longmen Mountain front, western Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(5): 621–631.
- [44] 周喜裕. 对湖南印支运动的认识[J]. 石油实验地质, 1982(04): 296–301.
- Zhou Xiyu. Awareness of the Indosinian movement in Hunan[J]. Petroleum Experimental Geology, 1982(04): 296–301.
- [45] 任纪舜. 印支运动及其在中国大地构造演化中的意义[J]. 中国地质科学院院报, 1984(02): 31–44.
- Ren Jizhen. Indosinian movement and its significance in the Tectonic Evolution of China[J]. Journal of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1984(02): 31–44.
- [46] 陈世悦, 李聪, 张鹏飞, 等. 江南—雪峰地区加里东期和印支期不整合分布规律[J]. 中国地质, 2011, 38(05): 1212–1219.
- Chen Shiyue, Li Cong, Zhang Pengfei, et al. Unconformity distribution of Caledonian and Indosinian periods in Jiangnan-Xuefeng area[J]. Chinese Geology, 2011, 38(05): 1212–1219.
- [47] 李勇, 苏德辰, 董顺利. 龙门山前陆盆地底部不整合面: 被动大陆边缘到前陆盆地的转换[J]. 岩石学报, 2011(08): 203–212.
- Li Yong, Su Dechen, Dong Shunli. Unconformity at the bottom of the Longmenshan foreland basin: conversion from passive continental margin to foreland basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011(08): 203–212.
- [48] 何鲤, 李梅, 熊亮, 等. 再谈四川盆地上三叠统层序地层划分方案[J]. 天然气工业, 2011, 31(06): 28–33+123.
- He Wei, Li Mei, Xiong Liang, et al. Discussion on the sequence stratigraphic division scheme of the Upper Triassic in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(06): 28–33+123.
- [49] 金文正, 汤良杰, 杨克明. 龙门山冲断带构造特征研究主要进展及存在问题探讨[J]. 地质论评, 2008(01): 39–48.
- Jin Wenzheng, Tang Liangjie, Yang Keming. Study on the main progress and existing problems of structural characteristics of the Longmenshan thrust belt[J]. Geological Review, 2008(01): 39–48.
- [50] 孙海涛, 张玉银, 柳慧林, 等. 四川盆地东部下寒武统龙王庙组白云岩类型及其成因[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 318–329.
- Sun Haitao, Zhang Yuyin, Liu Huilin, et al. Typological analysis and genetic mechanism of dolomite in the lower Cambrian Longwangmiao Formation, eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 318–329.
- [51] 厚东琳. 白云石化对储层发育的控制作用——以普光、元坝气田飞仙关组为例[J]. 断块油气田, 2019, 26(04): 449–452.
- Hou Donglin. Control effect of dolomitization on reservoir development: taking Feixianguan Formation in Puguang and Yuanba gas fields for example[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(04): 449–452.
- [52] 刘树根, 罗志立, 戴苏兰. 龙门山冲断带的隆升和川西前陆盆地的沉降[J]. 地质学报, 1995(03): 15–24.
- Liu Shugen, Luo Zhili, Dai Sulan. The uplift of the Longmenshan thrust belt and the settlement of the western Sichuan foreland basin[J]. Journal of Geology, 1995(03): 15–24.
- [53] 刘树根, 赵锡奎, 罗志立. 龙门山造山带—川西前陆盆地系统构造事件研究[J]. 成都理工大学学报, 2001(03): 4–13.
- Liu Shugen, Zhao Xikui, Luo Zhili. Study on Systematic Structural Events of the Longmenshan Orogenic Belt-Western Sichuan Foreland Basin[J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 2001(03): 4–13.
- [54] 李勇. 论龙门山前陆盆地与龙门山造山带的耦合关系[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1998(02): 10–14.
- Li Yong. On the Coupling Relationship between the Longmenshan Foreland Basin and the Longmenshan Orogenic Belt[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology, 1998(02): 10–14.
- [55] 林耀庭, 熊淑君, 宋鹤彬. 氢氧同位素习性及其在四川盆地卤水成因分类的研究[J]. 四川地质学报, 2001, 21(3): 153–158.
- Lin Yaoting, Xiong Shujun, Song Hebin. Hydrogen and oxygen isotope habits and their classification of brine genesis in the Sichuan Basin[J]. Sichuan Journal of Geology, 2001, 21(3): 153–158.