

川中地区茅二段白云石化作用机制及分布模式

高兆龙¹, 彭瀚霖¹, 张玺华¹, 陈聪¹, 李天军¹,
李国蓉², 何钊³, 李肖肖⁴, 田家奇³

1 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院; 2 成都理工大学能源学院;

3 中国石化西南油气分公司; 4 云南省地质工程勘察有限公司

摘要 白云石化作用和白云岩分布是制约川中地区茅二段储层发育分布的关键因素。在岩心及岩石薄片观察的基础上,通过阴极发光、包裹体测温、碳氧稳定同位素、锶同位素、稀土元素等地球化学分析,深入开展了川中地区茅二段白云石化作用机制及分布模式研究。研究表明:①研究区内茅二段主要发育3种类型白云石:粉—细晶他形白云石、粉—中晶自形白云石、鞍形白云石。粉—细晶他形白云石为同生期蒸发海水白云石化作用形成,此类白云石化作用本身不产生储集空间,但却是白云岩储层形成的基础;粉—中晶自形白云石为早成岩期埋藏白云石化作用形成,此类白云石化作用部位晶间孔及晶间溶孔发育,可形成白云岩溶蚀孔隙型储层;鞍形白云石为早成岩期(东吴期)热液白云石化作用形成,此类白云石化作用伴有热液破裂作用和热液溶蚀作用,可导致溶蚀缝孔洞发育,形成白云岩溶蚀缝孔洞型储层。②与台缘断裂耦合的台地边缘带,是发育同生期海水白云石化作用、早成岩期埋藏白云石化作用、早成岩期热液白云石化作用的最佳部位,也是白云岩储层优势发育区带;台内高地区域,主要发育同生期海水白云石化作用和早成岩期埋藏白云石化作用,可成为白云岩储层较为发育的区带;台内洼地缺乏白云石化作用发生的有利条件,白云岩欠发育。

关键词 白云石化作用;白云岩分布;控储意义;茅二段;川中地区

中图分类号:TE122.2 **文献标识码**:A

引用:高兆龙,彭瀚霖,张玺华,等.川中地区茅二段白云石化作用机制及分布模式[J].海相油气地质,2024,29(4):372-384.

GAO Zhaolong, PENG Hanlin, ZHANG Xihua, et al. The mechanism and distribution model of dolomitization in the 2nd member of Maokou Formation in central Sichuan Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2024, 29(4): 372-384.

0 前言

近年来,川中地区茅二段天然气勘探取得重要突破,主要的产气层为白云岩层段^[1,2],白云石化作用和白云岩分布成为研究的热点,也是制约茅二段储层分布预测的关键因素。前人对茅口组白云石化及白云岩的关注和研究由来已久。早期,认为这些白云岩的形成和同生期大气水与海水混合白云石化作用、表生期大气水与海水混合白云石化作用、峨眉山玄武岩相关的热液白云石化作用、深埋白云石化作用有关,滩体、古断裂制约白云岩的发育分布^[3-5];后来,又有研究者认为它们是热水成因的白云岩,具体与这一时期的“热次盆”有关^[6-7],或认为无论是基质白云岩还是缝洞白云石都是构造-热液成因^[8-12]。近期,部分学者认为茅二段存在2期白云石化作用:第1期白云石化作用主要形成细—中

晶白云石,白云石化流体主要为同时期的局限海水,可形成大量晶间溶孔和晶间孔;第2期白云石化作用形成鞍形白云石,白云石化流体为深部的高盐度热液卤水,对储层起破坏作用^[13-18]。综上所述,直到目前,关于川中地区茅二段白云石类型、白云石化作用机制、白云石化作用的储渗空间意义的认识尚存在分歧,白云岩发育分布的控制因素也尚不明确,它们既是茅口组白云岩研究的难点,也是制约川中茅二段白云岩储层勘探开发进程的障碍。

本文以四川盆地中部的茅二段白云岩为研究对象,利用相关的岩心及岩石薄片资料,充分结合各种地球化学分析结果,系统总结了白云石的矿物学特征及地球化学特征,深入研究白云石化作用机制,提出了白云石化模式,探讨了白云岩发育分布的控制因素及分布模式,以期对川中地区茅二段白云岩储层的分布预测和天然气勘探开发提供借鉴和支撑。

收稿日期:2024-02-01;改回日期:2024-06-04

本文受中国石油天然气股份有限公司科技重大专项课题“碳酸盐岩油气富集规律及有利区带研究”(编号:2023ZZ16YJ01)资助

第一作者:高兆龙,硕士,工程师,主要从事碳酸盐岩油气勘探研究工作。通信地址:610041 四川省成都市高新区天府大道北段12号;E-mail: gaozhaolong@petrochina.com.cn

1 区域地质背景

四川盆地处于扬子板块西缘,经历了多期次的构造运动,是典型的多旋回性克拉通盆地。研究区位于四川盆地中部,构造上属于川中低缓褶皱带(图 1a)。中二叠世栖霞期沉积整体受加里东期古地貌影响,自盆地东西两侧向川中地区海水变浅。茅口期继承了栖霞期西高东低的沉积格局,茅口早期构造仍比较稳定。茅口末期华南地区发生了东吴运动,在我国南方广西以碰撞造山和前陆盆地形成特征,在广大扬子区以地壳抬升和不整合面发育为特征,四川盆地内,这一期不整合面可能是全盆地的^[19],泸州、开江古隆起部位岩溶及剥蚀改造最为强烈。随后,晚二叠世发生了峨眉地裂运动,以川西南地区强烈拉张及基性玄武岩大量喷发为

典型标志,四川盆地广大地区都有表现,这为四川盆地海相碳酸盐岩层系中广泛发育的岩浆期后热液作用创造了条件。三叠纪以来,特提斯洋的开启闭合、印度板块向欧亚板块的碰撞造成多期次断裂活动、多期次岩浆作用、多期次隆升成山、多期次盆地沉降,也多次改造了四川盆地。

基于薄片照片、岩心、测井及地震等资料,茅口组自下而上可分成3段,其中茅二段总体上为一套碳酸盐台地沉积,受拉张断裂活动影响,在研究区内西北部展现出台地—台洼相间发育的格局,东南部具有台地边缘—开阔台地格局,发育台地边缘、台内高地、台内洼地、开阔台地等相带(图1a)。岩性主要为灰色生物碎屑微晶灰岩、生物碎屑灰岩,夹生物碎屑或含生物碎屑粉—细晶白云岩,局部富含硅质结核和条带(图1b)。

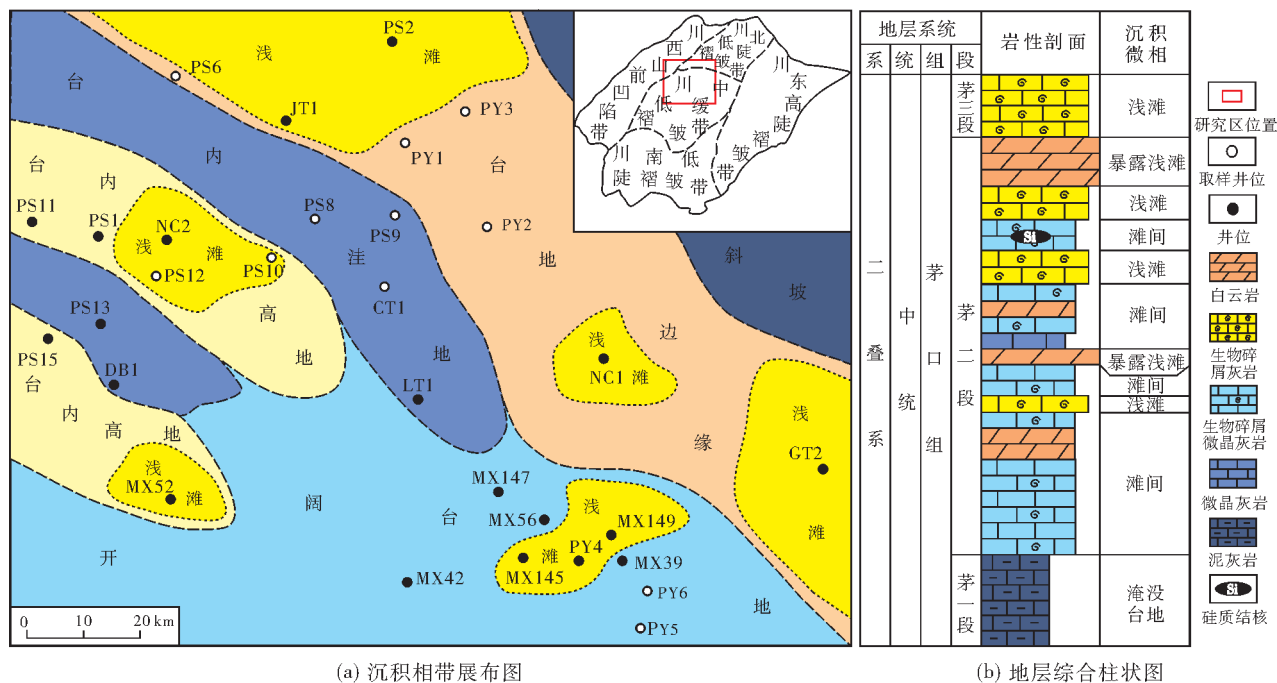


图1 川中地区茅二段沉积相平面图与地层综合柱状图

Fig. 1 Sedimentary facies plan and comprehensive column of the 2nd member of Maokou Formation in central Sichuan Basin

2 样品和实验方法

根据研究区内天然气钻井勘探及实际取心情况,本次实验的样品取自川中地区PS6井、PS8井、PS9井、PY2井、PY5井等11口井的岩心,所有样品精选后制成多个平行样品,便于阴极发光、碳氧同位素、稀土元素等测试项目的比对分析。

在岩心观察和薄片鉴定的基础上,选取了适量

样品进行阴极发光鉴定。选取了19个样品做了X衍射分析:在成都理工大学材料与化学化工学院X射线衍射实验室完成,使用仪器为DX-2700BH衍射仪,执行标准是SY/T 5163—2018。选取了8个白云石样品进行包裹体均一法温度测定:在成都理工大学能源学院实验室完成,使用仪器为Thmsg600-Dm2500p-Leica,执行标准为SY/T 6010—2011。选取了21个白云石样品进行碳氧稳定同位素分析:

在北京地时科技有限公司实验室完成,使用仪器为253plus稳定气体同位素质谱仪,执行标准为DZ/T 0184.17—1997,分析结果采用VPDB标准。选取12个样品进行锶同位素分析:在中国地质调查局天津地质调查中心实验室完成,使用仪器为Triton08-100016sb热电离质谱仪,执行标准为DZ/T 0184.4—1997。选取了18个样品进行稀土元素分析:在澳实分析检测(广州)有限公司澳实矿物实验室完成,使用ME-MS81g熔融法电感耦合等离子质谱测定稀土元素的含量,执行标准为DZ/T 0223—2001和GB/T 14506.30—2010。具体做法是往试样中加入硼酸锂($\text{LiBO}_2/\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$)熔剂,混合均匀,在熔炉中于1 025 °C下熔融,待熔融液冷却后,用硝酸、盐酸和氢氟酸消解并定容,最后在Ag-

ilent 7900电感耦合等离子体质谱仪上进行分析测定,测试结果相对偏差 $<10\%$,相对误差 $<10\%$,采用球粒陨石对结果进行标准化处理。

3 白云岩特征

3.1 岩石学特征

岩心及岩石薄片观察表明,研究区内茅二段碳酸盐岩中白云石(岩)非均质发育:台地边缘相带相对最为发育,台内高地相带及开阔台地浅滩区域较为发育,台内洼地相带相对不发育。根据岩石结构、宏微观特征、空间产状等将茅二段白云石划分成粉—细晶他形白云石、粉—中晶自形白云石、鞍形白云石等3种类型(图2)。

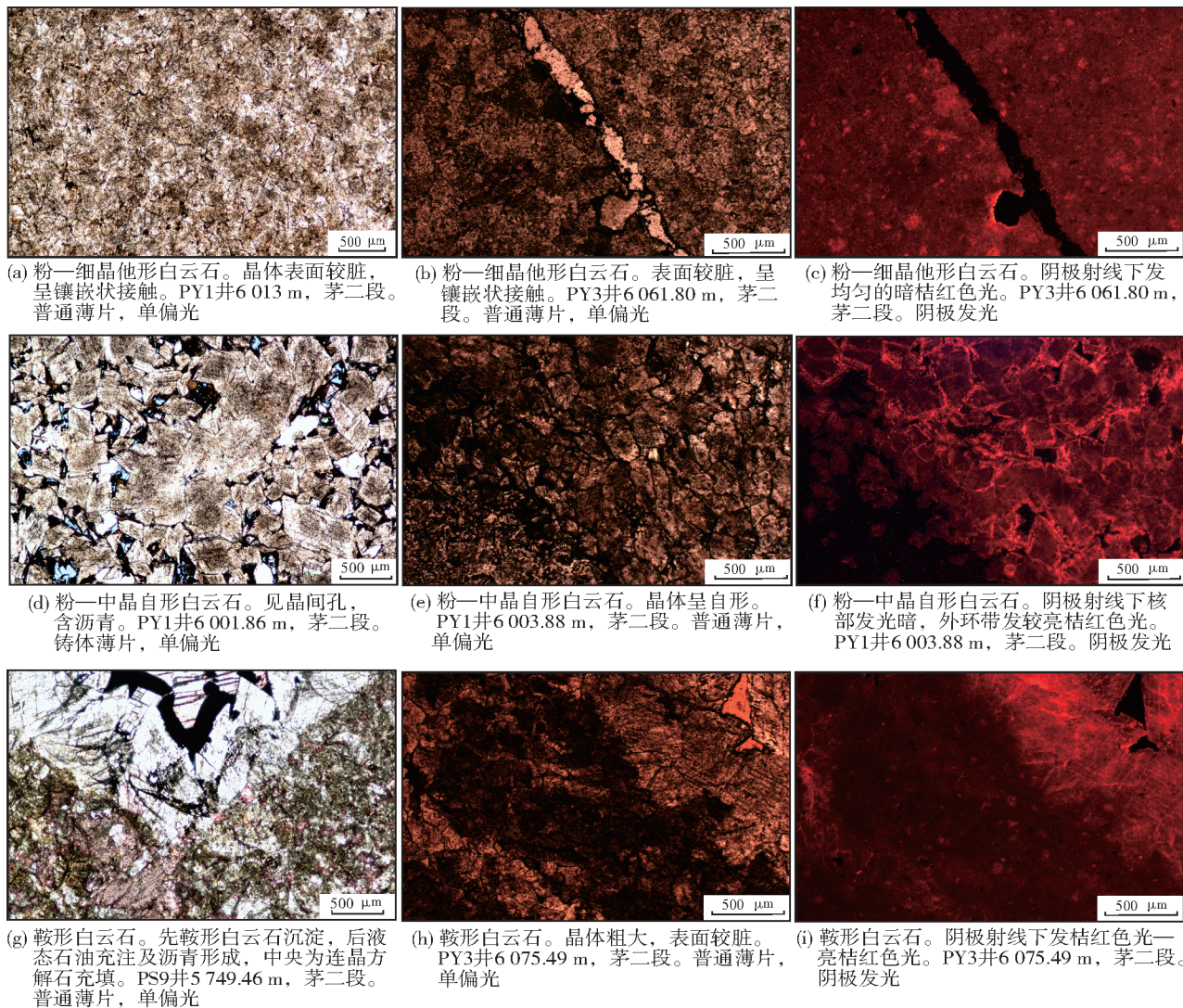


图2 川中地区茅二段白云石类型及岩石学特征

Fig. 2 Types and petrologic characteristics of dolomite in the 2nd member of Maokou Formation in central Sichuan Basin

3.1.1 粉—细晶他形白云石

粉—细晶他形白云石在研究区内大部分取心中都见有发育,其中在PY1井、PY3井、PY6井、PY12井中最为发育。它们呈斑状、不规则纹层状,或呈层状分布。白云石晶体可达粉—细晶,晶形不好,呈他形,表面较脏,晶体间往往呈镶嵌状接触,晶间孔及晶间溶孔不发育或欠发育(图2a,2b)。它们在阴极射线下发光较暗,发均匀的暗桔红色光(图2c)。

3.1.2 粉—中晶自形白云石

粉—中晶自形白云石在研究区茅二段岩心薄片均可见到,它们呈层状、斑状分布,或在岩石中分散状分布。白云石晶体较粗,以粉—细晶为主,少量达中晶,晶形好(呈菱形晶或其他形状自形晶),表面脏或较脏,晶间孔及晶间溶孔较为发育(图2d,2e)。阴极射线下发光特征(图2f),白云石核发光暗,白云石外环带发亮或较亮桔红色光。

粉—中晶自形白云石受到早成岩期硅化微晶

石英交代改造(图3a),晶间孔内可见早—中成岩期的液态烃类及沥青充填(图2d,图3b),白云石可受到早—中成岩期的缝合线切割改造(图3c),据此可推测此类白云石形成于早成岩期浅埋藏阶段。

3.1.3 鞍形白云石

鞍形白云石(图2g)在研究区茅二段碳酸盐岩中较为常见。此类白云石晶体粗大,中—粗晶为主,部分达巨晶,晶形不好(晶面可呈弧形),表面较脏或较干净,正交光下波状消光。鞍形白云石可在热液破裂缝、不规则缝洞内沉淀生长(图2h),或在石灰岩中呈斑状交代形成。阴极射线下发光特征(图2i),鞍形白云石发桔红色、亮桔红色光(图2i)。

鞍形白云石在东吴期岩溶缝洞中央沉淀生长或交代(图3d),白云石外围见有沥青充填(图2g)。在薄片上可观察到鞍形白云石充填之后受到缝合线(图3e)、中晚成岩期热液石英切割交代(3f),据此可推测此类白云石在早成岩期形成,形成于晚二叠世峨眉地裂运动及其玄武岩喷发时期。

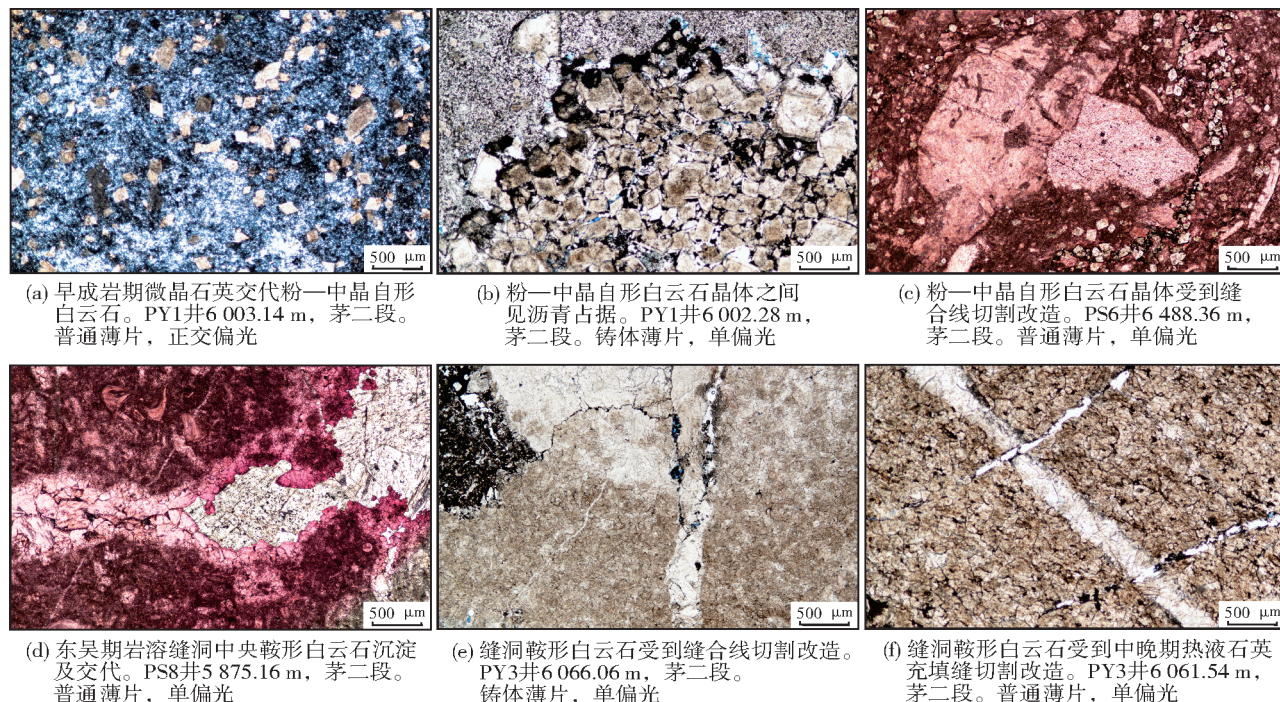


图3 粉—中晶自形白云石、鞍形白云石与其他成岩组构之间的关系

Fig. 3 Micrographs showing relationship between very fine-medium crystalline euhedral dolomite, saddle dolomite and other diagenetic fabric

3.2 白云石有序度

PY1井、PY3井及PS10井等井的样品的X衍射分析结果表明(图4):粉—细晶他形白云石有序度相对较低,为0.70~0.85,平均值为0.77;粉—中晶自

形白云石有序度较高,为0.81~0.85,平均值为0.83;鞍形白云石的有序度变化范围较大,为0.60~1.00,平均值为0.83。总体揭示了随着白云石晶形变好、晶体变大,有序度增大的趋势。

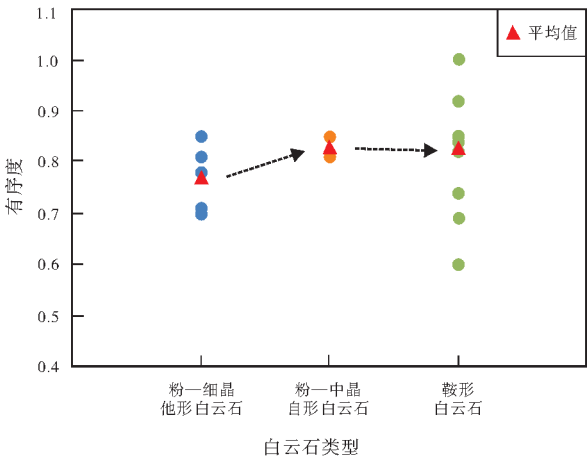


图4 川中地区茅二段白云石有序度分布
Fig. 4 Order degree distribution of dolomite in the 2nd member of Maokou Formation in central Sichuan Basin

基于白云石有序度的影响因素^[20]分析,可以认为粉—细晶他形白云石有序度相对较低,揭示了沉积环境为蒸发环境,成岩流体盐度较高,Mg²⁺供给充分,从而导致白云石结晶速度快,有序度较低。而粉—中晶自形白云石有序度最高,则可能是埋藏成岩环境下Mg²⁺的供给相对不足,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的反映。鞍形白云石有序度变化范围大,也揭示了鞍形白云石形成环境和结晶速度的差异。

3.3 包裹体均一温度

本次实验仅在鞍形白云石中发现较多的适合测温的气液两相盐水包裹体,测试结果显示,其均一温度变化范围为150~250℃(图5),其中峰值温度在180~220℃范围的包裹体占了69%。

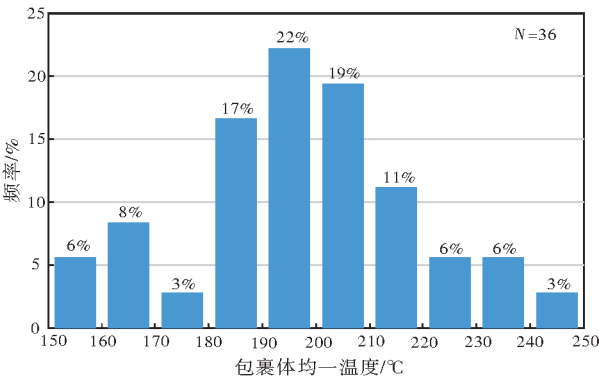


图5 川中地区茅二段鞍形白云石包裹体均一温度分布直方图
Fig. 5 Homogenization temperature histogram of saddle dolomite inclusions in the 2nd member of Maokou Formation in central Sichuan Basin

基于前述鞍形白云石成岩作用的序列关系及前人研究^[16-18]分析,鞍形白云石可能在晚二叠世玄武岩形成之后就形成,推断当时的埋藏深度约为500~600 m,按地表温度为25℃、地温梯度为3℃/100 m计算,则得到当时正常地层的埋藏温度可能在40~43℃之间。显然,研究区内茅二段鞍形白云石的包裹体均一温度显著高于形成时期的正常埋深温度,提示了鞍形白云石的形成不仅受正常埋深地层内部流体的作用,还存在地下深部上来的热液流体的增温作用,可能是深部热液流体与地层内部流体混合作用的结果。

3.4 碳氧同位素特征

研究区茅二段白云石样品的碳氧稳定同位素测试结果见表1。茅二段白云石样品的δ¹³C值主要

表1 川中地区茅二段白云石碳氧锶同位素分析结果
Table 1 Test results of δ¹³C, δ¹⁸O and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr of dolomite samples from the 2nd member of Maokou Formation in central Sichuan Basin

井号	井深或单块号	样品类型	δ ¹³ C _{VPDB} /‰	δ ¹⁸ O _{VPDB} /‰	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr
PY1	3-78-6	粉—细晶他形白云石	5.96	-4.27	0.707 587
			5.94	-4.20	
	5-28-13		4.60	-4.16	
PY3	5-28-1	粉—细晶他形白云石	4.22	-5.81	0.707 535
	5-28-9		4.07	-6.81	
	4-83-44		3.96	-6.86	
PY1	4-83-39	粉—中晶自形白云石	4.17	-6.29	0.707 139
	5-28-21		4.06	-6.62	
	3-78-8		5.92	-4.39	0.707 590
PY1	4-68-4	粉—中晶自形白云石	5.72	-4.44	
	4-83-25		4.10	-4.05	
PY3	4-83-39	鞍形白云石	3.95	-6.66	0.707 605
	4-83-50		4.16	-6.53	
	4-83-70		4.10	-5.89	0.707 577
PY3	5-28-1	鞍形白云石	4.15	-4.92	
	5-28-9		4.33	-6.13	0.707 652
	5-28-13		4.53	-5.06	
PY1	5-28-21	生物碎屑微晶灰岩	4.08	-6.69	0.707 727
	5-28-25		4.23	-6.38	
	5-28-25		4.22	-6.50	0.707 671
PS10	5-28-27	生物碎屑灰岩	4.29	-5.93	
	3-78-33		4.63	-6.63	0.707 756
	4-68-27		4.68	-7.26	
PS11	3-123-88	生物碎屑灰岩	4.51	-7.67	0.707 337
PS11	2-84-69	生物碎屑灰岩			0.707 317

在 3.95‰~5.96‰ 之间。粉—细晶他形白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 3.96‰~5.96‰, 平均值为 4.62‰; 粉—中晶自形白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 5.72‰~5.92‰, 平均值为 5.82‰; 鞍形白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 3.95‰~4.53‰, 平均值为 4.19‰。碳同位素组成总体上在 Veizer 等^[21] 恢复的二叠纪海水碳酸盐矿物碳同位素值 (1.50‰~6.50‰) 范围之内。

茅二段白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布在 -6.86‰~-4.05‰ 之间, 不同类型的白云石存在差异: 粉—细晶他形白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布范围较大, 介于 -6.86‰~-4.16‰, 平均值为 -5.63‰; 粉—中晶自形白云石 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对较高, 介于 -4.44‰~-4.39‰, 平均值为 -4.42‰; 鞍形白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值略低, 在 -6.69‰~-4.05‰ 之间, 平均值为 -5.89‰。

对碳氧稳定同位素组成进行交会投点 (图 6a), 可见其主要在 2 个区域分布: 其一是 2 个粉—细晶他形白云石和 2 个粉—中晶自形白云石所在的高 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布区; 其二是鞍形白云石和其他白云石所在的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 相对低值分布区。

一般认为, 碳酸盐矿物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值主要受流体类型和温度控制, $\delta^{13}\text{C}$ 值受碳来源控制^[22]。茅二段 2 个粉—细晶他形白云石样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值相比围岩灰岩和其他白云石明显偏高, 代表了未受后期改造的粉—细晶他形白云石的碳氧同位素组成, 揭示其形成环境可能为地表低温高盐度蒸发海水; 而其他粉—细晶他形白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对较低, 向着鞍形白云石的碳氧稳定同位素组成靠拢, 加之这

些样品的发育分布与鞍形白云石密切相关, 因此认为这些白云石形成之后又受到热液改造。PY1 井粉—中晶自形白云石样品的碳氧同位素组成值也明显偏高, 可能代表了其形成时期的组成特征, $\delta^{18}\text{O}$ 值较粉—细晶他形白云石略有降低, 则反映了埋藏条件下温度的影响, 但两者的 $\delta^{18}\text{O}$ 值没有大的区别, 可能指示它们是一个连续白云石化作用的过程。鞍形白云石显示出 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围稳定、 $\delta^{18}\text{O}$ 值较低的特征, 与前人认识的川中地区中二叠统或茅口组东吴期热液成因的鞍形白云石一致, 指明其为热液成因。虽然鞍形白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对于未受改造的粉—细晶他形白云石、粉—中晶自形白云石有所降低, 但若假设这 3 类白云石化流体相似, 那么根据鞍形白云石形成的条件, 温度对其 $\delta^{18}\text{O}$ 值的影响应该更大, 这暗示了除了温度的影响外, 还有 $\delta^{18}\text{O}$ 值更高的外部流体加入到鞍形白云石的沉淀过程中。

为了进一步明确鞍形白云石的成岩流体性质, 采用 Land 提出的公式^[23] 计算其成岩流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值:

$$1000 \ln \alpha_{(\text{白云石}-\text{水})} = 3.14 \times 10^6 T^{-2} - 2.0 \quad (1)$$

$$\alpha_{(\text{白云石}-\text{水})} = (1000 + \delta^{18}\text{O}_{\text{白云石}}) / (1000 + \delta^{18}\text{O}_{\text{流体}}) \quad (2)$$

式(1)~(2)中: T 为鞍形白云石的包裹体均一温度, $\delta^{18}\text{O}_{\text{白云石}}$ 为鞍形白云石的氧同位素组成值。计算得到鞍形白云石成岩流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 6.63‰~14.39‰ (图 6b), 明显高于茅二段海水及其演化来源的地层水, 这也揭示了鞍形白云石的形成可能与岩浆热液来源有关。

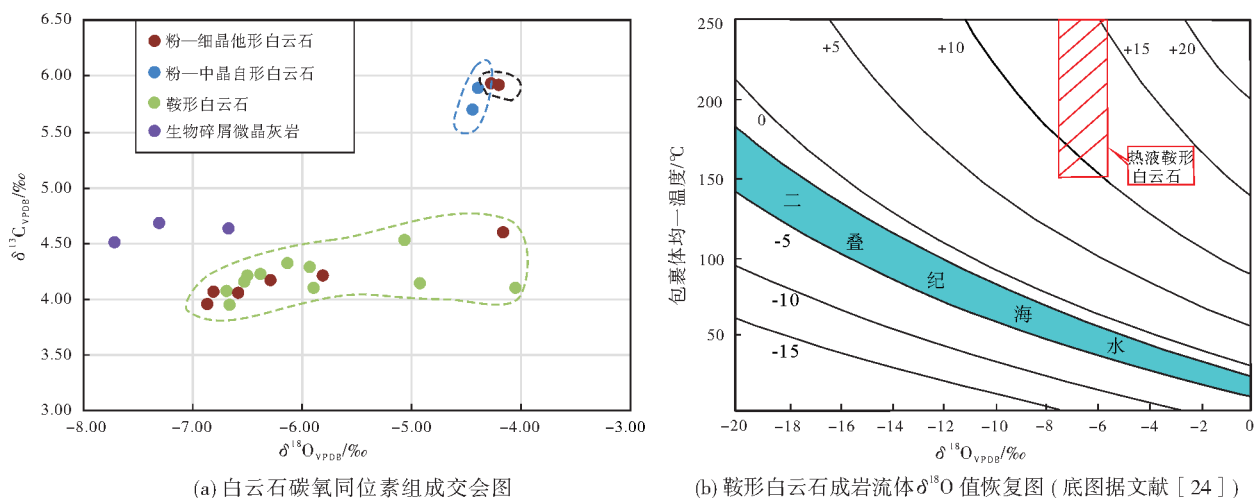


图6 川中地区茅二段白云石碳氧同位素组成交会图与鞍形白云石成岩流体 $\delta^{18}\text{O}$ 值恢复图

Fig. 6 The $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ crossplot of dolomite and $\delta^{18}\text{O}$ value recovery diagram of saddle dolomite diagenetic fluid in the 2nd member of Maokou Formation in central Sichuan Basin

3.5 锶同位素特征

研究区内茅二段白云石样品的锶同位素测试分析结果表明(表1,图7):生物碎屑微晶灰岩和生物碎屑灰岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值介于0.707 262~0.707 337,平均值为0.707 305;粉—细晶他形白云石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值介于0.707 139~0.707 587,平均值为0.707 448;粉—中晶自形白云石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值介于0.707 408~0.707 590,平均值为0.707 499;鞍形白云石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值介于0.707 577~0.707 756之间,平均值为0.707 665。

一般认为白云石矿物中普遍含铷(Rb)并可致其⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值相对海相方解石有所升高。茅二段粉—细晶他形白云石、粉—中晶自形白云石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值比生物碎屑微晶灰岩略高,但都在二叠系海相碳酸盐岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值范围内,指示这些白云石化流体为茅口期正常海水或蒸发高盐度海水。鞍形白云石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值不仅明显高于生物碎屑微晶灰岩,也明显比其他2类白云石的高,则指示白云石化流体不全是茅口期正常海水和高盐度海水,可能还有⁸⁷Sr/⁸⁶Sr

值较高的壳源流体的加入和作用,暗示了深部岩浆热液上升过程中受到了壳源流体的加入改造。

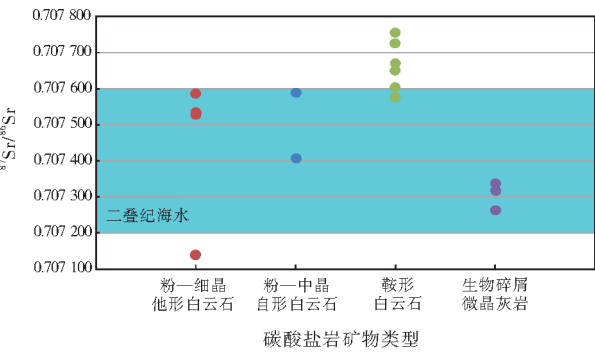


图7 川中地区茅二段白云石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值分布

Fig. 7 Distribution of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr values of dolomites in the 2nd member of Maokou Formation in central Sichuan Basin

3.6 稀土元素特征

研究区内茅二段白云石样品的稀土元素测试分析结果表明(表2,图8a),不同类型白云石的稀土元素配分模式既具有相似性,又具有差异性。

表2 川中地区茅二段白云石样品的稀土元素测试分析结果

Table 2 Test results of rare earth elements of dolomite samples from the 2nd member of Maokou Formation in central Sichuan Basin

序号	井号	样号	样品类型	稀土元素含量/(μg·g ⁻¹)													
				La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1	PY1	2		<0.1	<0.1	<0.02	<0.1	<0.03	<0.02	<0.05	<0.01	<0.05	<0.01	<0.03	<0.01	<0.03	<0.01
2		4		0.2	<0.1	<0.02	0.1	0.05	<0.02	<0.05	<0.01	<0.05	<0.01	0.03	<0.01	<0.03	<0.01
3	PY3	16	粉—细晶	0.7	0.1	0.07	0.3	0.06	0.02	0.08	<0.01	0.08	<0.01	0.04	<0.01	<0.03	<0.01
4		17	他形	0.8	0.4	0.10	0.4	0.06	<0.02	0.10	<0.01	0.09	<0.01	0.07	<0.01	<0.03	<0.01
5		23	白云石	1.2	0.6	0.12	0.5	0.12	0.03	0.12	<0.01	0.13	<0.01	0.09	<0.01	0.05	<0.01
6		27		1.0	0.7	0.16	0.6	0.17	0.03	0.16	<0.01	0.14	0.01	0.10	<0.01	0.05	<0.01
7	PY3	29		0.8	0.7	0.13	0.5	0.11	0.02	0.12	<0.01	0.10	<0.01	0.06	<0.01	0.03	<0.01
8		1	粉—中晶	<0.1	0.1	<0.02	<0.1	<0.03	<0.02	<0.05	<0.01	<0.05	<0.01	<0.03	<0.01	<0.03	<0.01
9		6	自形	0.2	<0.1	0.03	0.1	<0.03	<0.02	<0.05	<0.01	<0.05	<0.01	<0.03	<0.01	<0.03	<0.01
10		10	白云石	<0.1	<0.1	0.04	0.1	0.03	<0.02	0.05	0.01	<0.05	0.02	0.06	0.01	0.05	0.01
11		13		0.9	0.6	0.14	0.6	0.12	<0.02	0.15	<0.01	0.15	0.01	0.12	<0.01	0.08	<0.01
12		15		1.1	0.8	0.14	0.5	0.10	<0.02	0.09	<0.01	0.09	<0.01	0.05	<0.01	0.03	<0.01
13		24		0.9	1.1	0.12	0.5	0.13	<0.02	0.13	<0.01	0.12	<0.01	0.07	<0.01	0.03	<0.01
14		26	鞍形	1.0	0.9	0.17	0.6	0.16	0.02	0.17	<0.01	0.16	0.01	0.12	<0.01	0.08	<0.01
15		28	白云石	0.7	0.7	0.14	0.6	0.15	<0.02	0.15	<0.01	0.13	0.01	0.10	<0.01	0.07	<0.01
16		30		1.4	1.6	0.23	0.8	0.15	<0.02	0.17	<0.01	0.13	<0.01	0.09	<0.01	0.03	<0.01
17	PY1	31		1.1	1.2	0.17	0.6	0.14	<0.02	0.12	<0.01	0.12	<0.01	0.06	<0.01	<0.03	<0.01
18		33		2.3	2.5	0.27	0.9	0.18	<0.02	0.14	<0.01	0.11	<0.01	0.07	<0.01	0.03	<0.01
19		7	微晶	0.5	<0.1	0.06	0.3	0.06	0.02	0.08	<0.01	0.05	<0.01	0.03	<0.01	<0.03	<0.01
20		36	灰岩	0.8	1.3	0.15	0.6	0.10	<0.02	0.09	<0.01	0.10	<0.01	0.07	<0.01	0.03	<0.01

粉—细晶他形白云石轻稀土元素略富集, 普遍贫重稀土元素, 负 Ce 异常, 无 Eu 异常或弱负 Eu 异常, 与生物碎屑微晶灰岩样品最具有相似性, 揭示了粉—细晶他形白云石的成岩流体为海水流体。

粉—中晶自形白云石贫轻稀土和重稀土元素, 负 Ce 异常和正 Eu 异常明显, 与来自同一口井的生物碎屑微晶灰岩具有相似性, 又有差异性。相似性表现在它们的轻稀土和重稀土元素都贫, 具负 Ce 异常; 差异性体现在生物碎屑微晶灰岩是负 Eu 异常, 而粉—中晶自形白云石具正 Eu 异常, 这可能说明粉—中晶自形白云石成岩流体仍是海水来源, 但正 Eu 异常则提示白云岩形成于浅埋藏环境。

鞍形白云石明显富轻稀土元素、贫重稀土元素, 具弱负 Ce 异常、负 Eu 异常、负 Tb 异常、负 Ho 异常特征。在稀土元素配分模式图上, 能看出鞍形白云石与生物碎屑微晶灰岩、其他类型白云石都明显不一样, 这反映了鞍形白云石成岩流体不全是茅口期正常海水和蒸发高盐度海水, 还有地层外部流体的加入。矿物 Eu 含量及其异常状况与流体本身的 Eu 含量、分配系数和矿物的行为、氧化还原环境条件有关^[25]。已有研究揭示塔里木盆地古城地区寒

武系—奥陶系热液成因的鞍形白云石既可出现 Eu 正异常, 也可出现 Eu 负异常, Eu 正异常可能代表了基性岩浆热液地质作用, Eu 负异常可能代表了中酸性岩浆热液地质作用^[26-27]。研究区内茅二段鞍形白云石的相对富稀土元素和 Eu 负异常则与前述锆同位素特征一脉相承, 揭示了有较富集稀土元素的壳源流体的加入, 暗示了深部岩浆热液上升过程中受到了壳源流体的加入改造。少量粉—细晶他形白云石样品的稀土元素组成与鞍形白云石具有一定的相似性, 也反映它们后来受到热液作用改造。

各类白云石的 $\delta\text{Eu}-\delta\text{Ce}$ 交会图(图 8b), 也进一步清楚地展现了不同类型白云石的分布区域不一样: 粉—细晶他形白云石可从正 Eu 异常、负 Ce 异常区域向负 Eu 异常、负 Ce 异常区域变化; 粉—中晶自形白云石在正 Eu 异常、负 Ce 异常区域分布; 鞍形白云石分布在负 Eu 异常、弱负 Ce 异常区域。粉—细晶他形白云石、粉—中晶自形白云石分布在同一个区域, 其成岩流体与海水相联系, 鞍形白云石分布在另外区域, 则指明其成岩流体不全是茅口期海水, 有外部流体或深部热液流体的加入。

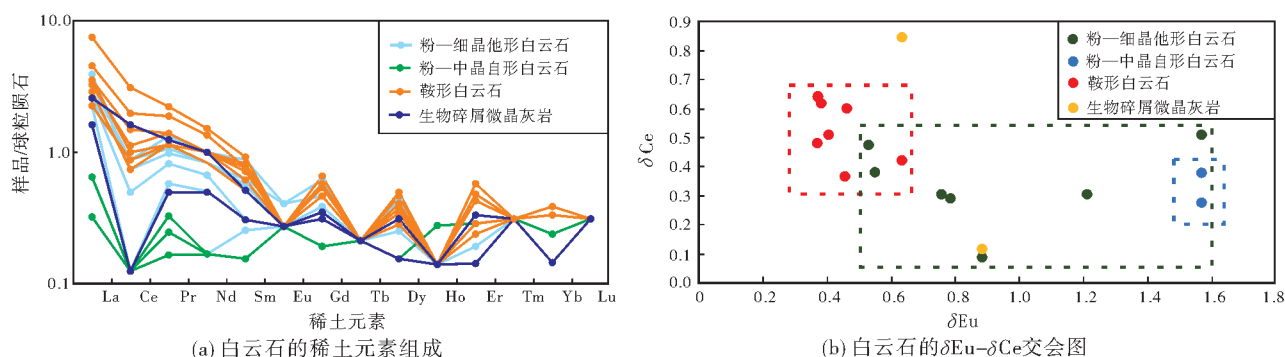


图8 川中地区茅二段白云石的稀土元素配分模式图与 $\delta\text{Eu}-\delta\text{Ce}$ 交会图

Fig. 8 REE distribution pattern diagram and $\delta\text{Eu}-\delta\text{Ce}$ crossplot of dolomites in the 2nd member of Maokou Formation in central Sichuan Basin

4 白云石化作用模式及其对储渗空间的影响

基于前述白云石岩石学、矿物学及地球化学特征分析, 认为川中地区茅二段碳酸盐岩受到3期特征有别、性质有异的白云石化作用: 粉—细晶他形白云石是同生期蒸发海水白云石化作用形成; 粉—中晶自形白云石是早成岩期浅埋藏白云石化作用形成; 鞍形白云石是早成岩期热液白云石化作用形成。它们对储渗空间的影响也不一样。

4.1 同生期蒸发海水白云石化作用模式

粉—细晶他形白云石是蒸发环境下快速白云石化作用的产物, 其在分布上受沉积环境高部位暴露蒸发制约, 发育部位为沉积环境高部位及相邻的低部位, 成岩流体为高盐度蒸发海水, 成岩作用发生于地表或近地表低温氧化条件下, 因此可以用同生期蒸发海水白云石化作用模式来解释此类白云石的形成(图 9a)。沉积环境高处暴露蒸发部位(滩体顶部)发生蒸发泵白云石化作用, 形成泥—粉

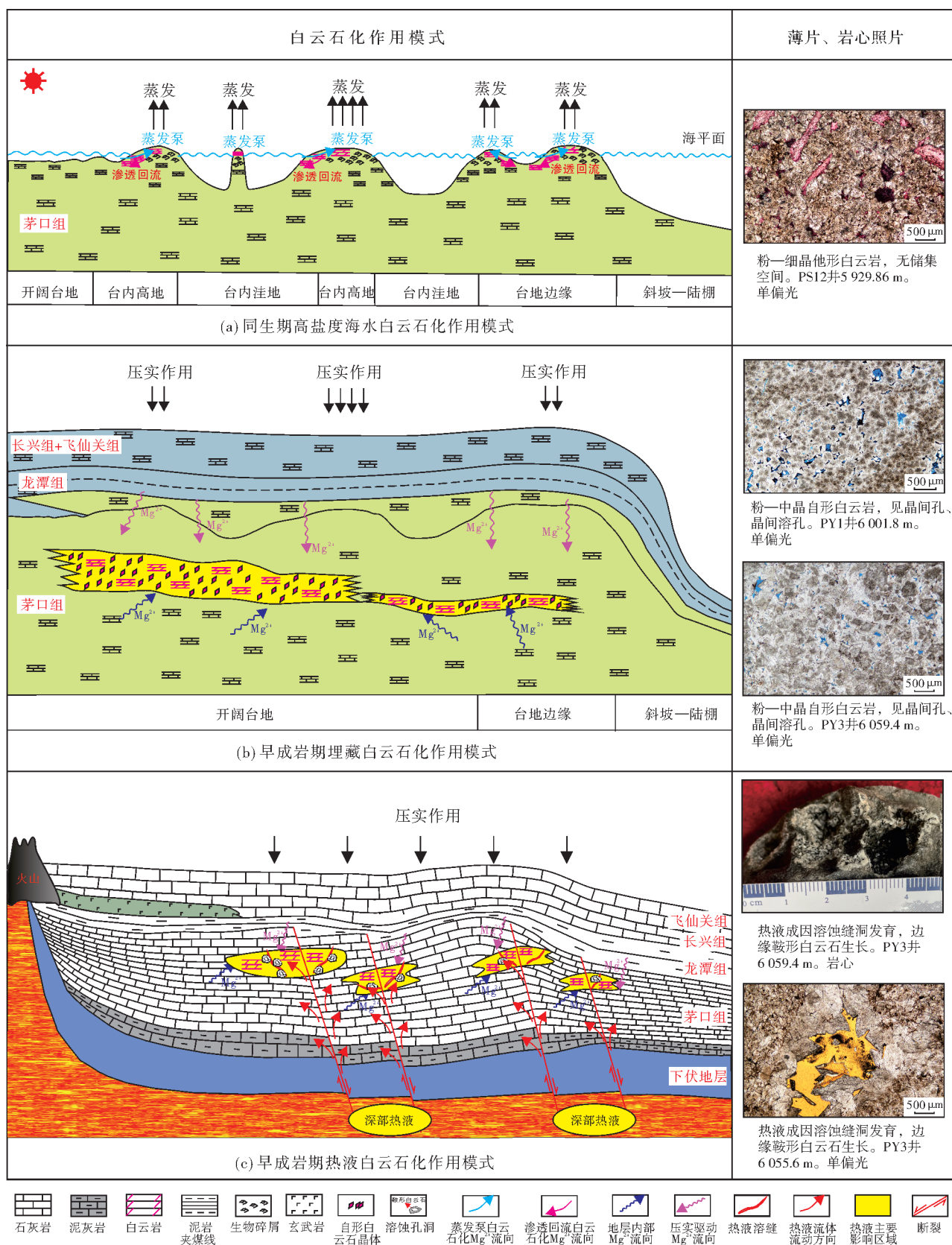


图9 川中地区茅二段白云石化作用模式

Fig. 9 The dolomitization model of the 2nd member of Maokou Formation in central Sichuan Basin

晶白云石,邻近的沉积环境低部位则因蒸发高盐度海水向下渗透发生白云石化作用,形成粉—细晶他形白云石。

此类白云石化作用过程本身不形成晶间孔,也不伴随溶蚀作用,因此不产生储渗空间。岩心及薄片观察也证实了研究区内茅二段仅靠同生期蒸发海水白云石化作用难以形成储渗空间和有效储层。

4.2 早成岩期埋藏白云石化作用模式

粉—中晶自形白云石是在茅口组碳酸盐岩沉积之后在埋藏过程中形成的,成岩流体为茅口组地层水,因此可以用早成岩期埋藏白云石化作用模式来解释此类白云石的形成(图9b)。 Mg^{2+} 来源于茅口组石灰岩地层水,以及高镁方解石和黏土矿物转变释放的 Mg^{2+} ,成岩流体由茅口组石灰岩地层水和黏土矿物转变释出水组成,流体的运动依靠压实作用驱动。

埋藏白云石化过程中,由于 Mg^{2+} 的供给欠充分,白云石微沉淀速度小于方解石微溶解速度,由此产生白云石晶体生长的自由空间,形成晶形比较好的白云石,岩石中晶间孔发育,因此,有利于白云石储层的发育。研究区内PS12井、PY1井、PY3井有关层段的岩心及薄片观察也证实,埋藏白云石化作用形成的粉—中晶自形白云石部位晶间孔、晶间溶孔发育,这些孔隙中还可可见有液态石油充注和后期产生的残留沥青(图2d,图3b)。

4.3 早成岩期热液白云石化作用模式

鞍形白云石形成于晚二叠世,属于早成岩期,结合前述地球化学特征及四川盆地晚二叠世峨眉地裂运动及其玄武岩广泛发育分布的情况,推测成岩流体除了茅口组地层内部流体外,还有地下深部岩浆活动期后的热液流体,因此可以用早成岩期热液白云石化作用模式来解释此类白云石的形成(图9c)。热液上升过程中受到壳源流体加入改造,白云石化作用需要的 Mg^{2+} 主要来源于茅口早期白云石的溶解,流体的运动主要由构造和压实作用驱动。深部来源的热液对 Mg^{2+} 离子供给的作用不大,但对流体的流动和混合提供了重要能量,使流体有较大的活动范围,因此,热液成因的鞍形白云石不仅大量发育在断裂部位及其附近,还可发育在离断裂较远的地方。

与岩浆期后热液相关的热液白云石化作用,往往伴随热液破裂作用和热液溶蚀作用,导致热液缝孔洞储渗空间的形成。有关岩心及薄片观察表明,

研究区内PY1井、PY2井、PY3井、PY5井和PY6井等井茅二段的早成岩期与热液白云石化作用相关的缝孔洞较为发育,缝洞内鞍形白云石部分充填,并有大量剩余空间保存下来,构成了重要的储渗空间。由此,可以认为早成岩期热液白云石化作用是研究区内茅二段主要储层形成的重要机制。

需要说明的是,尽管研究区内茅二段同生期蒸发海水白云石化作用难以形成储渗空间和储层,但不能否定其在储层形成中的基础作用。由于 Mg^{2+} 供给方面的原因,这些同生期蒸发海水白云石化作用发育部位,有利于后期埋藏白云石化作用的发生,有利于晶间孔、晶间溶孔及其储层的形成。这些部位还有利于较纯白云岩的形成,相应部位岩石脆性程度增强,又有利于后期热液破裂作用、热液白云石化及热液溶蚀作用的发育,从而向着优质储层转化。经钻井剖面储层综合解剖揭示研究区内茅二段优质储层主要为白云岩溶蚀缝孔洞型储层,也证实了早期白云石化作用控制、多期白云石化作用联动制约纯白云岩段和优质储层的发育。

5 白云石(岩)分布模式

5.1 白云石(岩)发育特征

川中地区3类白云石化作用的相关统计分析结果表明:台地边缘区域蒸发海水白云石化作用、埋藏白云石化作用、热液白云石化作用均最为发育,出现的频率分别为27.96%、18.75%、35.82%;台内高地区域蒸发海水白云石化作用、埋藏白云石化作用较为发育,出现的频率分别为4.92%、7.47%;台内洼地区域主要为埋藏白云石化作用和热液白云石化作用,发育程度弱,出现频率分别为3.73%、1.35%。

根据统计,台地边缘相带白云岩最为发育,白云岩厚度百分比较大,可占86.95%;台内高地相带,白云岩较为发育,白云岩厚度百分比为13.05%;而台内洼地相带,白云岩欠发育。

5.2 白云石(岩)发育分布模式

由于四川盆地茅二期区域上为正常盐度浅海环境,局部暴露成为早期白云石化发生的必要条件,其延伸作用逐步影响了后期的白云石化作用和白云岩的发育。总的来说,白云岩发育分布与沉积环境关系较为密切,认为研究区内茅二段白云石(岩)共存在3种分布模式(图10):①台地边缘、台内

高地的暴露蒸发控制了同生期蒸发海水白云石化作用及其白云石(岩)的优势发育分布。②台缘边缘、台内高地部位的暴露蒸发进一步影响后期埋藏白云石化作用及白云石(岩)的优势发育分布。③断裂与台地边缘的耦合,使台缘区域成为热液成因白云石(岩)的优势分布区域。

可见,在台地边缘,同生期蒸发海水白云石化作用、早成岩期埋藏白云石化作用、早成岩期热液白云石化作用等3类白云石化作用发育,成为白云岩优势发育相带;台内高地区域同生期蒸发海水白云石化作用、早成岩期埋藏白云石化作用较为发育,可成为白云岩较为发育的区带;台内洼地缺乏白云石化作用发生的有利条件,白云岩欠发育。需要说明的是,茅二段白云石化作用发生的特殊地质背景,造成白云岩发育分布有一定的规律性,也具有较强的非均质性,应充分注意这一特征,提高天然气勘探的成功率。

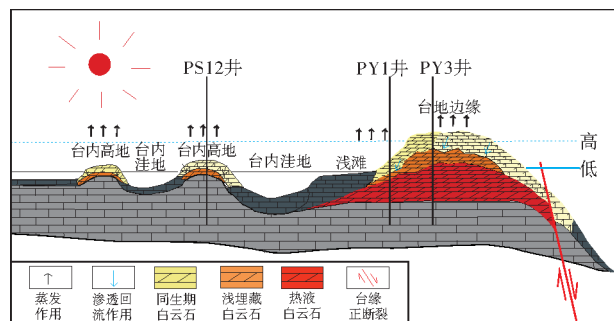


图10 川中茅二段白云石(岩)发育分布模式

Fig. 10 The development and distribution model of dolomites in the 2nd member of Maokou Formation in central Sichuan Basin

6 结论

(1)川中地区茅二段存在粉—细晶他形白云石、粉—中晶自形白云石、鞍形白云石等3种类型白云石。粉—细晶他形白云石晶体较小,晶体间镶嵌状接触,阴极射线下发较均匀的暗桔红色光;粉—中晶自形白云石晶体较粗,晶间孔发育,阴极射线下发具环带状发光,白云石核发光暗,白云石外环带发亮或较亮桔红色光;鞍形白云石晶体粗大,晶面可呈弧形,正交光下具波状消光,阴极射线下发桔红色光或亮桔红色光。

(2)粉—细晶他形白云石为同生期蒸发海水白云石化作用形成,此类白云石化作用本身不产生储集空间,但在白云岩储层形成中具有基础作用;粉—中晶自形白云石为早成岩期埋藏或浅埋藏白云石化作用

形成,此类白云石化作用部位晶间孔及晶间溶孔发育,可形成白云岩溶蚀孔隙型储层;鞍形白云石为早成岩期(东吴期)热液白云石化作用形成,此类白云石化作用伴有热液破裂作用和热液溶蚀作用,导致溶蚀缝孔洞发育和白云岩溶蚀缝孔洞型储层形成。

(3)在台地边缘,同生期海水白云石化作用、早成岩期埋藏白云石化作用、早成岩期热液白云石化作用等3类白云石化作用发育,成为白云岩优势发育相带;台内高地区域同生期蒸发海水白云石化作用、早成岩期埋藏白云石化作用较为发育,可成为白云岩较为发育的区带;台内洼地缺乏白云石化作用发生的有利条件,白云岩欠发育。

参考文献

- [1] 印长海, 师江波, 谭秀成, 等. 四川盆地中部合川—潼南地区茅二下亚段白云岩储层特征及成储机制[J]. 海相油气地质, 2024, 29(2): 136–146.
YIN Changhai, SHI Jiangbo, TAN Xiucheng, et al. Characteristics and formation mechanism of dolomite reservoirs in the lower submember of Maokou Member 2 in Hechuan–Tongnan area, central Sichuan Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2024, 29(2): 136–146.
- [2] 刘宏, 马腾, 谭秀成, 等. 表生岩溶系统中浅埋藏构造—热液白云岩成因: 以四川盆地中部中二叠统茅口组为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 916–927.
LIU Hong, MA Teng, TAN Xiucheng, et al. Origin of structurally controlled hydrothermal dolomite in epigenetic karst system during shallow burial: an example from Middle Permian Maokou Formation, central Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum exploration and development, 2016, 43(6): 916–927.
- [3] 陈明启. 川西南下二叠统新统白云岩成因探讨[J]. 沉积学报, 1989(2): 45–50.
CHEN Mingqi. A discussion of the origin of Yangxin dolomite of Lower Permian in southwest Sichuan[J]. Acta sedimentologica sinica, 1989(2): 45–50.
- [4] 刘树根, 罗志立, 庞家黎, 等. 四川盆地西部的峨眉地裂运动及找气新领域[J]. 成都地质学院学报, 1991(1): 83–90.
LIU Shugen, LUO Zhili, PANG Jiali, et al. The Emei taphrogenesis and the new regions for searching gas in the western part of Sichuan Basin[J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1991(1): 83–90.
- [5] 王运生, 金以钟. 四川盆地地下二叠统白云岩及古岩溶的形成与峨眉地裂运动的关系[J]. 成都理工学院学报, 1997(1): 12–20.
WANG Yunsheng, JIN Yizhong. The formation of dolomite and paleokarst of the Lower Permian Series in Sichuan Basin and the relation to the Emei taphrogenesis[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1997(1): 12–20.
- [6] 李毅, 沈浩, 石学文, 等. 川东—川中地区茅口组白云岩成因初探及“热次盆”概念的提出[J]. 天然气勘探与开发, 2013, 36(4): 1–3, 29.

- LI Yi, SHEN Hao, SHI Xuwen, et al. Distribution and origin of dolomites in Maokou Formation, eastern and central Sichuan Basin[J]. Natural gas exploration and development, 2013, 36(4): 1-3, 29.
- [7] 汪华, 沈浩, 黄东, 等. 四川盆地中二叠统热水白云岩成因及其分布[J]. 天然气工业, 2014, 34(9): 25-32.
- WANG Hua, SHEN Hao, HUANG Dong, et al. Origin and distribution of hydrothermal dolomites of the Middle Permian in the Sichuan Basin[J]. Natural gas industry, 2014, 34(9): 25-32.
- [8] 陈轩, 赵文智, 张利萍, 等. 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, 2012, 33(4): 562-569.
- CHEN Xuan, ZHAO Wenzhi, ZHANG Liping, et al. Discovery and exploration significance of structure-controlled hydrothermal dolomites in the Middle Permian of the central Sichuan Basin[J]. Acta petrolei sinica, 2012, 33(4): 562-569.
- [9] 陈轩, 赵文智, 刘银河, 等. 川西南地区中二叠统热液白云岩特征及勘探思路[J]. 石油学报, 2013, 34(3): 460-466.
- CHEN Xuan, ZHAO Wenzhi, LIU Yinhe, et al. Characteristics and exploration strategy of the Middle Permian hydrothermal dolomite in southwestern Sichuan Basin[J]. Acta petrolei sinica, 2013, 34(3): 460-466.
- [10] 李祖兵, 欧加强, 陈轩, 等. 川中地区下二叠统白云岩储层特征及发育主控因素[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(4): 1-8.
- LI Zubing, OU Jiaqiang, CHEN Xuan, et al. Characteristics and main development controlling factors for Lower Permian dolomite reservoirs in Chuanshan region[J]. Petroleum geology & oilfield development in Daqing, 2017, 36(4): 1-8.
- [11] 刘建强, 郑浩夫, 刘波, 等. 川中地区中二叠统茅口组白云岩特征及成因机理[J]. 石油学报, 2017, 38(4): 386-398.
- LIU Jianqiang, ZHENG Haofu, LIU Bo, et al. Characteristics and genetic mechanism of the dolomite in the Middle Permian Maokou Formation, central Sichuan area[J]. Acta petrolei sinica, 2017, 38(4): 386-398.
- [12] 张涛, 林娟华, 韩月卿, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组热液白云岩发育模式及对储层的改造[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 132-143, 200.
- ZHANG Tao, LIN Juanhua, HAN Yueqing, et al. Pattern of hydrothermal dolomitization in the Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin, and its alteration on reservoirs herein[J]. Oil & gas geology, 2020, 41(1): 132-143, 200.
- [13] 胡安平, 潘立银, 郝毅, 等. 四川盆地二叠系栖霞组、茅口组白云岩储层特征、成因和分布[J]. 海相油气地质, 2018, 23(2): 39-52.
- HU Anping, PAN Liyin, HAO Yi, et al. Origin, characteristics and distribution of dolostone reservoir in Qixia Formation and Maokou Formation, Sichuan Basin, China[J]. Marine origin petroleum geology, 2018, 23(2): 39-52.
- [14] 郝毅, 姚倩颖, 田瀚, 等. 四川盆地二叠系茅口组沉积特征及储层主控因素[J]. 海相油气地质, 2020, 25(3): 202-209.
- HAO Yi, YAO Qianying, TIAN Han, et al. Sedimentary characteristics and reservoir-controlling factors of the Permian Maokou Formation in Sichuan Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2020, 25(3): 202-209.
- [15] 周进高, 郝毅, 邓红婴, 等. 四川盆地中西部栖霞组—茅口组孔洞型白云岩储层成因与分布[J]. 海相油气地质, 2019, 24(4): 77-88.
- ZHOU Jingao, HAO Yi, DENG Hongying, et al. Genesis and distribution of vuggy dolomite reservoirs of the Lower Permian Qixia Formation and Maokou Formation, western-central Sichuan Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2019, 24(4): 77-88.
- [16] 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): 236-249.
- 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): 236-249.
- [17] 黎霆, 诸丹诚, 李海平, 等. 中二叠统茅口组白云岩发育机理: 以川中—川东地区为例[J]. 现代地质, 2020, 34(2): 345-355.
- LI Ting, ZHU Dancheng, LI Haiping, et al. Genetic mechanism of dolomite in Middle Permian Maokou Formation: case study of central and eastern Sichuan Basin[J]. Geoscience, 2020, 34(2): 345-355.
- [18] 肖钦仁, 袁海峰, 叶子旭, 等. 川中北部地区八角场构造二叠系茅口组白云岩储层成因机制[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(7): 1218-1236.
- XIAO Qinren, YUAN Haifeng, YE Zixu, et al. Genetic mechanism of dolomite reservoir in Permian Maokou Formation in Bajiaochang structure in north central Sichuan[J]. Natural gas geoscience, 2023, 34(7): 1218-1236.
- [19] 张玺华, 陈聪, 黄婕, 等. 四川盆地中二叠统广元—巴中拉张槽的发现及其油气地质意义[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(4): 466-475.
- ZHANG Xihua, CHEN Cong, HUANG Jie, et al. The discovery of Middle Permian Guangyuan-Bazhong extensional trough in the Sichuan Basin and its petroleum geological significance[J]. China petroleum exploration, 2019, 24(4): 466-475.
- [20] 曾理, 万茂霞, 彭英. 白云石有序度及其在石油地质中的应用[J]. 天然气勘探与开发, 2004, 27(4): 64-66, 72.
- ZENG Li, WAN Maoxia, PENG Ying. Dolomite sequentiality and its application to petroleum geology[J]. Natural gas exploration and development, 2004, 27(4): 64-66, 72.
- [21] VEIZER J, ALA D, AZMY K, et al. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater[J]. Chemical geology, 1999, 161(1/3): 59-88.
- [22] ARTHUR M A, ANDERSON T F, KAPLAN I R, et al. Stable isotopes in sedimentary geology[M]. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1983.
- [23] LAND L S. The application of stable isotopes to studies of the origin of dolomite and to problems of diagenesis of clastic sed-

- iments[M]//ARTHUR M A, ANDERSON T F, KAPLAN I R, et al. Stable isotopes in sedimentary geology. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1983: 1–22.
- [24] GIVEN R K, LOHMANN K C. Derivation of the original isotopic composition of Permian marine cements [J]. Journal of sedimentary research, 1985, 55(3): 430–439.
- [25] 王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- WANG Zhonggang, YU Xueyuan, ZHAO Zhenhua, et al. Rare earth element geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [26] 邵红梅, 卢曦, 李国蓉, 等. 热液作用对塔东地区寒武系碳酸盐岩储集层的影响[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(3): 277–282.
- SHAO Hongmei, LU Xi, LI Guorong, et al. Hydrothermal process and its effect on Cambrian carbonate reservoirs in Taidong area [J]. Xinjiang petroleum geology, 2015, 36(3): 277–282.
- [27] 冯子辉, 邵红梅, 刘云苗, 等. 塔里木盆地古城地区奥陶系成岩流体与碳酸盐岩储层形成关系研究[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(4): 47–60.
- FENG Zihui, SHAO Hongmei, LIU Yunmiao, et al. Study on the relationship between the Ordovician diagenetic fluid and carbonate reservoir development in Guchenq area, Tarim Basin[J]. China petroleum exploration, 2022, 27(4): 47–60.

编辑: 韦东晓

The mechanism and distribution model of dolomitization in the 2nd member of Maokou Formation in central Sichuan Basin

GAO Zhaolong¹, PENG Hanlin¹, ZHANG Xihua¹, CHEN Cong¹, LI Tianjun¹,
LI Guorong², HE Zhao³, LI Xiaoxiao⁴, TIAN Jiaqi³

1. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company;

2. College of Energy, Chengdu University of Technology; 3. Southwest Oil and Gas Company, SINOPEC;

4. Yunnan Geological Engineering Survey Co., Ltd

Abstract: Dolomitization and dolomite distribution are the key factors that restrict the development and distribution of reservoir of the 2nd member of Maokou Formation in central Sichuan Basin. Based on the previous research results of dolomite and the understanding of regional geological background, through the observation of core and thin sections, and the introduction of cathode luminescence, X-ray diffraction, inclusion, C and O stable isotope, Sr isotope and REE analysis, the further study of dolomitization of the 2nd member of Maokou Formation in central Sichuan Basin has been carried out. The results show that: (1) There are three types of dolomite in the study area: very fine-fine crystalline anhedral dolomite, very fine-medium crystalline euhedral dolomite, and saddle dolomite. Very fine-fine crystalline anhedral dolomite is formed by syngenetic evaporative seawater dolomitization. This dolomitization does not produce reservoir space itself, but plays a fundamental role in the formation of dolomite reservoirs. Very fine-medium euhedral dolomite is formed by burial dolomitization in the early diagenetic period, and the intergranular pores and intergranular dissolution pores are developed at the site of dolomitization, which can form dolomite dissolution pore type reservoir. Saddle dolomite is formed by hydrothermal dolomitization in early diagenetic period (Dongwu period). This dolomitization is accompanied by hydrothermal fracture and hydrothermal dissolution, which can lead to the development of dissolution fractures and the formation of dolomite dissolution fracture and cavernous reservoirs. (2) Marginal platform, coupling with the platform margin fault, is the best place to develop syngenetic seawater dolomitization, burial dolomitization and hydrothermal dolomitization in the early diagenetic period, and is also the advantageous development zone of dolomite reservoir. In the intra-platform highland area, syngenetic evaporative seawater dolomitization and burial dolomitization in the early diagenetic period are mainly developed, making it a relatively favorable zone for dolomite reservoir development. However, intra-platform depressions lack favorable conditions for dolomitization, resulting in poor dolomite development.

Key words: dolomitization; dolomite distribution; the significance of controlling reservoir; 2nd member of Maokou Formation; central Sichuan Basin

GAO Zhaolong, First author: MSc, Engineer, mainly engaged in the exploration and research of carbonate rock oil and gas. Add: No.12, North Section of Tianfu Avenue, Chengdu High-tech Zone, Sichuan 610041, China. E-mail: gaozhaolong@petrochina.com.cn