

南羌塘古油藏白云岩成因机制及其油气地质意义

张健^{1,2,3}, 王剑^{3,4}, 张建勇^{5,6}, 熊绍云^{5,6}, 郑波^{3,4}, 沈利军^{3,4}

1 中国地质科学院; 2 中国地质大学(北京); 3 西南石油大学; 4 油气藏地质与开发工程全国重点实验室;

5 国家能源碳酸盐岩油气重点实验室; 6 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室

摘要 南羌塘隆鄂尼—昂达尔错—达卓玛古油藏白云岩是羌塘盆地最有利的碳酸盐岩储层之一,其成因机制对于羌塘盆地油气勘探突破具有十分重要的意义。在岩石薄片鉴定的基础上,结合碳氧稳定同位素、锶同位素、微量和稀土元素等测试分析,对古油藏白云岩成因机制及白云岩储层的形成演化开展研究。结果表明:①研究区共发育6种类型白云岩(石),分别为泥—粉晶残余结构白云岩、他形—半自形细晶白云岩、自形细晶白云岩、他形中—粗晶白云岩、雾心亮边晶粒白云岩和后期孔洞充填的马鞍形白云石。②古油藏白云岩存在多种成因。泥—粉晶残余结构白云岩成因为准同生期微生物白云石化作用,他形—半自形细晶白云岩和他形中—粗晶白云岩成因为浅埋藏阶段回流渗透白云石化作用,自形细晶白云岩成因为埋藏白云石化作用,雾心亮边晶粒白云岩是后期抬升至近地表混合水白云石化作用的产物。古油藏白云岩孔洞中大量充填的马鞍形白云石是热液白云石化作用的产物。③南羌塘古油藏白云岩储层受白云石化、大气淡水淋滤和热液溶蚀等成岩作用改造形成次生孔隙,形成了良好的规模储层,可作为油气勘探目的层之一。建立了南羌塘古油藏白云岩成因模式,为羌塘盆地油气成藏演化研究与优质碳酸盐岩储层预测提供了新的理论依据。

关键词 地球化学特征;白云岩成因;储层演化;古油藏;南羌塘

中图分类号:TE122.2 **文献标识码**:A

引用: 张健,王剑,张建勇,等. 南羌塘古油藏白云岩成因机制及其油气地质意义[J]. 海相油气地质, 2024, 29(2): 147-163.

ZHANG Jian, WANG Jian, ZHANG Jianyong, et al. Genetic mechanism and its oil and gas geological significance of dolomites of the Long'en-Angdarc-Dazuoma palaeo-reservoir in southern Qiangtang Basin, China [J]. Marine origin petroleum geology, 2024, 29(2): 147-163.

0 前言

羌塘盆地位于我国青藏高原,是一个典型的含油气叠合盆地^[1]。近年来,随着地质勘探工作在羌塘盆地大量开展,盆地内先后发现了超过200处的油气显示,表明羌塘盆地具有良好的油气勘探潜力^[2-3]。位于南羌塘隆鄂尼—昂达尔错—达卓玛地区的古油藏带,东西向展布超过180 km、南北向展布超过30 km,是羌塘盆地最重要的碳酸盐岩储层研究的窗口^[4-6]。白云岩是古油藏储层的主要岩石类型,其成因研究直接影响对羌塘盆地优质储层形成机制的认识。前人已经对南羌塘古油藏白云岩的形成机理开展了一些研究,提出的成因模式主要

有混合水白云石化作用^[7-10]和高温埋藏白云石化作用^[11-14]。在本世纪初,有学者根据是否与膏岩层同时出现,将羌塘盆地白云岩划分为2类成因:蒸发泵白云石化作用形成I型白云岩(与膏岩层同时出现),主要分布于北羌塘盆地;混合水白云石化作用形成II型白云岩(未与膏岩层同时出现),主要位于南羌塘隆鄂尼—昂达尔错地区一带^[7]。随后,一些学者通过包裹体测温和原位微区同位素测试发现隆鄂尼—昂达尔错地区白云岩的结晶温度在100~216℃之间,认为该地区白云岩为高温成因^[11-14]。近年来,随着研究程度的不断深入,学者们在古油藏中识别出多种特征各异的白云岩,单一成因模式已经难以解释古油藏白云岩的成岩机理,多期次多

收稿日期:2024-01-16; 改回日期:2024-02-27; 网络出版日期:2024-05-29

本文受国家自然科学基金项目“羌塘盆地侏罗纪成盐环境与盐构造演化及其油气赋存效应”(编号:42241202)、“羌地-17井低温热年代学记录对羌塘盆地早期隆升的约束”(编号:42102131)和中国石油“十四五”前瞻性基础性课题“羌塘盆地构造沉积演化与基本石油地质条件研究”(编号:2021DJ0801)的联合资助

第一作者: 张健,在读博士,主要从事碳酸盐岩和含油气盆地分析方向的研究。通信地址:610500 四川省成都市新都大道8号 西南石油大学;E-mail: zhang199j@163.com

通信作者: 王剑,博士,教授,主要从事大地构造沉积学与含油气盆地分析方面的教学与研究。通信地址:610500 四川省成都市新都大道8号 西南石油大学;E-mail: w1962jian@163.com

成因白云石化共同作用形成白云岩的认识^[15-16]被提出。并且最新的古生物鉴定和碳酸盐原位 U-Pb 定年研究认为隆鄂尼—昂达尔错—达卓玛古油藏沉积时代可能为晚三叠世,而不是之前认为的中侏罗世^[17],这也使得白云石化机制的研究更加复杂。

本文基于隆鄂尼—昂达尔错—达卓玛古油藏隶属于晚三叠世^[17]这一观点,在镜下岩石学、矿物学研究的基础上,结合微量元素、碳氧稳定同位素、锶同位素、稀土元素等地球化学分析,对古油藏白云岩的形成环境和成岩流体性质进行系统研究,探讨古油藏白云岩的成因,并揭示白云岩形成过程与储层孔隙演化的耦合关系,以期对羌塘盆地油气成藏演化研究和优质碳酸盐岩储层预测提供新的理论依据。

1 地质背景

羌塘盆地位于青藏高原中北部,面积约为 $22 \times 10^4 \text{ km}^2$,整体呈东西向展布于可可西里—金沙江缝合带和班公湖—怒江缝合带之间(图 1a)。以中央隆起带为界,可以划分为南羌塘坳陷和北羌塘坳陷

陷,呈“两坳夹一隆”的构造格局^[1,5]。羌塘盆地是发育在前寒武系稳定基底之上的叠合型盆地,在地质历史上经历了多次盆地性质的转变^[6,18-25]。中三叠世,羌塘盆地是主要接受碎屑岩沉积的前陆盆地,此时南羌塘坳陷为隆起区^[21]。晚三叠世至早白垩世,受新特提斯洋新一轮扩张的影响,羌塘盆地转变为克拉通边缘裂陷—坳陷盆地^[1]。受盆地性质的控制,羌塘中生代盆地内部出露地层以海相的三叠系、侏罗系为主,其中南羌塘坳陷中生代沉积最早的地层是上三叠统日干配组杂岩^[22]。早—中侏罗世南羌塘地区受班公湖—怒江洋俯冲作用控制发育由弧前—岩浆弧—弧后盆地组成的“一隆两坳”古地貌,并沉积了曲色组页岩和布曲组石灰岩。之后随着拉萨地块和羌塘地块的全面碰撞,南羌塘盆地从弧相关盆地卷入前陆盆地褶皱冲断带中,发生差异埋藏和隆升剥蚀^[26]。早白垩世,南羌塘坳陷发育大量逆冲推覆构造,地层剥蚀量可达 3.8~4.5 km,是隆鄂尼—昂达尔错—达卓玛古油藏大规模形成的时期^[27](图 1b)。

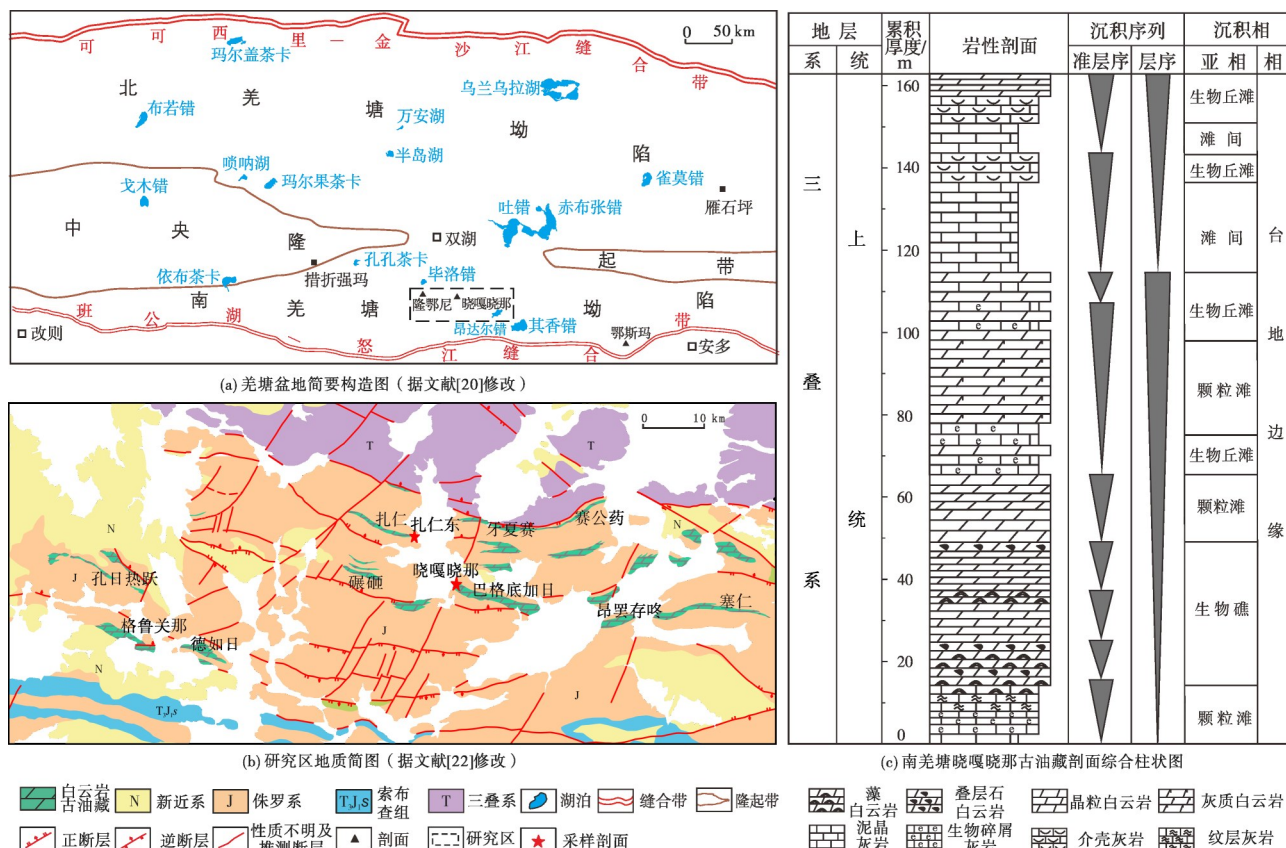


Fig. 1 The distribution and comprehensive column of the Long'en-Angdarco-Dazuoma palaeo-reservoir in southern Qiangtang Basin

隆鄂尼—昂达尔错—达卓玛古油藏呈东西向展布于南羌塘坳陷北部^[6]。古油藏碳酸盐岩最早沉积于晚三叠世卡尼期—诺利期,此时期羌塘盆地受控于南侧班公湖—怒江洋盆扩展,发生持续海侵^[1]。古油藏地层与下伏姜钟组滨海相碎屑岩沉积^[23]和上覆扎那组细碎屑岩沉积^[28]共同组成了一套反映持续沉降环境的沉积组合,其中碳酸盐岩地层主要发育于古地理相对高点的近岸碳酸盐台地环境中^[2]。古油藏碳酸盐岩沉积后,受燕山晚期和喜马拉雅期幕式构造运动的影响,经历了

多期次、多来源成岩流体的改造,形成了厚度达50~150 m的白云岩地层^[15]。典型古油藏剖面主要包含白云岩与石灰岩2种岩石类型,发育台地边缘生物礁滩、颗粒滩等高能相带碳酸盐沉积(图1c)。剖面中的白云岩主要为晶粒白云岩(图2a)及藻叠层白云岩(图2b)。白云岩受到成岩作用的影响,大部分原岩的沉积结构受到不同程度的破坏,与石灰岩差异明显(图2c)。白云岩地层以似层状、块状横向展布为特征(图2d),局部区域发育抗浪生物礁格架,与巨厚块状石灰岩接触关系清晰(图2e)。

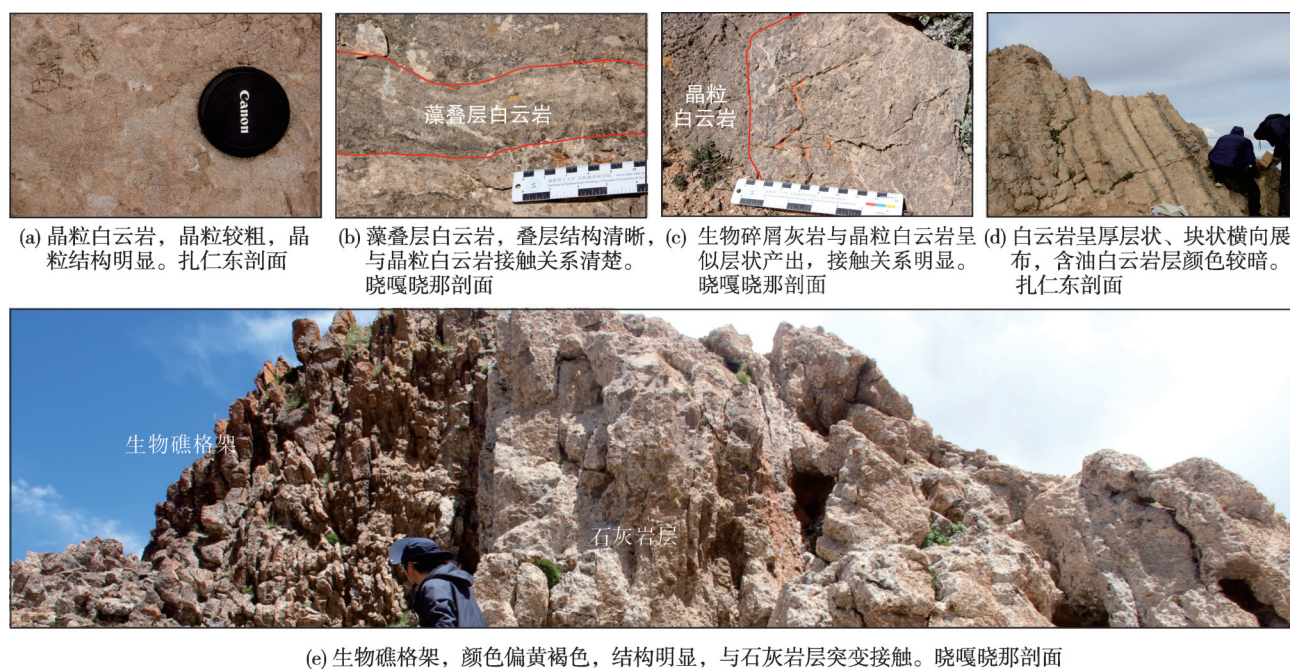


图2 南羌塘隆鄂尼—昂达尔错—达卓玛古油藏野外剖面特征

Fig. 2 The field characteristics of the Long'en-angdarco-dazuoma palaeo-reservoir in southern Qiangtang Basin

2 样品采集及分析测试

本次研究的样品来自南羌塘隆鄂尼—昂达尔错—达卓玛古油藏西部、位于双湖县东南约15 km的晓嘎晓那(简称XGXN)和扎仁东(简称ZRD)2个剖面(图1b),共采集样品120件。样品类型主要为白云岩、石灰岩以及孔洞充填物。选取其中约110件样品磨制薄片,进行镜下岩矿分析。镜下鉴定工作在西南石油大学羌塘盆地研究院进行,使用仪器包括Leica DM750P偏光显微镜、Leica DM750P + Canada BII-CLF2阴极发光观察设备和江南NSZ818体视镜。

根据岩矿分析结果,挑选部分合适的样品进行

碳氧稳定同位素、锶同位素、微量和稀土元素分析。为了提高测试数据的准确性,根据样品的具体情况进行了严格的前处理:白云岩样品比较纯净,采用溶解法,在避开被后期胶结物充填或溶蚀蚀变区域后,采用牙钻进行微区取样;对于白云石晶体半径小、分布不均匀的白云岩样品则使用原位激光烧蚀法进行取样。本次实验总共选取34个碳酸盐岩样品进行碳氧稳定同位素测定,实验设备为Delta V Advantage同位素质谱仪,标准样品为GBW04405和内部标样811,实验标准为VPDB;选取23个样品采用化学溶解法进行锶同位素测定,实验设备为TRITON PLUS热电离同位素质谱仪,标准样品为NBS987;另选取19个样品进行微量和稀土元素分

析,实验设备为Nu Plasma II型多接收电感耦合等离子体质谱仪(iCAP TQ)和ASI RESOLUTION SE激光剥蚀系统,标准样品为NIST610、NIST612、NIST614和MACS-3,稀土元素测试数据使用澳大利亚太古宙页岩(PAAS)进行标准化^[29]。碳氧稳定同位素、锶同位素、微量和稀土元素分析测试均在国家能源碳酸盐岩油气重点实验室进行。

3 白云岩特征

3.1 岩石学特征

通过野外露头观察和镜下薄片鉴定,明确南羌塘古油藏白云岩主要包含泥—粉晶残余结构白云岩和晶粒白云岩两大类,其中晶粒白云岩又可细分为他形—半自形细晶白云岩、自形细晶白云岩、他形中—粗晶白云岩和雾心亮边晶粒白云岩等4种类型。此外,古油藏白云岩中发育大量马鞍形白云石充填物。

3.1.1 泥—粉晶残余结构白云岩

泥—粉晶残余结构白云岩主要包括藻粘结白

云岩、藻团块白云岩、藻叠层白云岩:藻粘结白云岩(图3a)由微晶基质白云石和少量的亮晶白云石胶结物组成,以富有机质黑色藻丝体胶结碳酸盐微粒形成较为致密结构为特征;藻团块白云岩(图3b)由藻类粘结形成的暗色块状白云石颗粒和呈基底式胶结的亮晶白云石胶结物组成,其中部分颗粒在埋藏过程中发生强烈重结晶,原始沉积结构被破坏,仅保留块状残余阴影,在镜下表现为具有幻影结构的微晶—粉晶白云石团块;藻叠层白云岩以水平或向上生长的层状结构为特征,绝大多数样品受到白云石化作用的影响,仅剩余少量暗色微生物阴影(图3c)。在泥—粉晶残余结构白云岩样品中可识别出球状、簇状等微生物白云石(图3d)。

3.1.2 晶粒白云岩

晶粒白云岩在古油藏中广泛发育,按照白云石的结构特征、晶体大小及晶型,可细分为他形—半自形细晶白云岩、自形细晶白云岩、他形中—粗晶白云岩及雾心亮边晶粒白云岩等4种类型。

他形—半自形细晶白云岩(图3e)内白云石晶

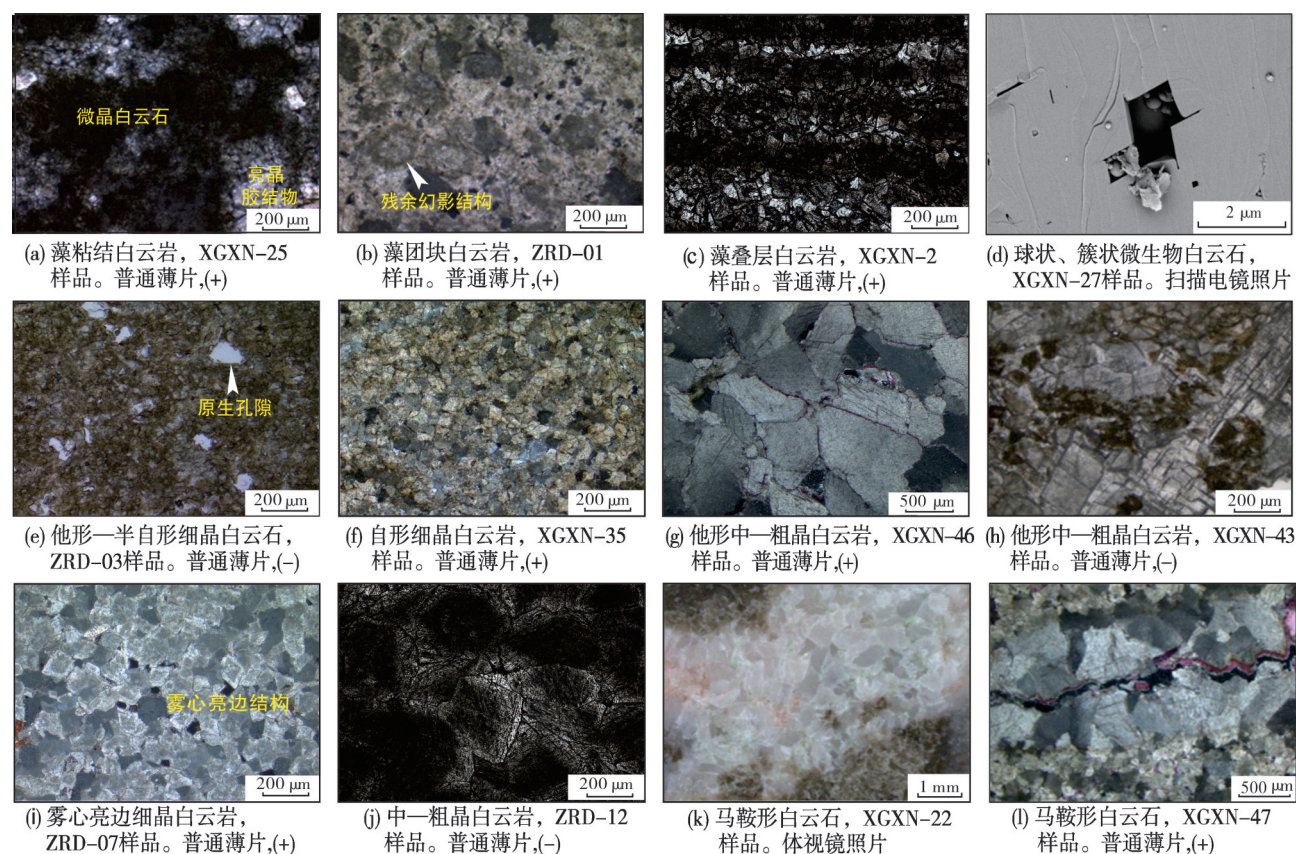


图3 南羌塘隆鄂尼—昂达尔错—达卓玛古油藏带白云岩岩石学特征

Fig. 3 Petrographic images showing details of dolomites of the Long'en-Angdarco-Dazuoma palaeo-reservoir in southern Qiangtang Basin

体自形程度相对较低,晶体边界不规则,晶粒半径较小,晶体表面较为浑浊,原生孔隙较为发育,可见少量残余沉积结构。自形细晶白云岩(图3f)内白云石晶体自形程度较高,晶面较平直,自形程度随晶粒增大逐渐增高,晶间孔隙较发育。他形中一粗晶白云岩(图3g),晶体自形程度差,晶体内部较为纯净,晶面弯曲,颗粒之间呈线接触和镶嵌接触,是过度白云石化的产物。他形中一粗晶白云岩(图3h)多与细晶白云岩伴生,晶间孔隙较为发育,并见沥青充填。此外,部分晶粒白云岩中发育大量具雾心亮边结构的白云石,核心区域有大量未及时排出的杂质。雾心亮边白云岩(图3i)多呈半自形—自形晶,晶面较为平直;而随着晶体增大,白云石晶体过度生长形成镶嵌结构(图3j),晶面相对弯曲,自形程度降低,以他形晶为主。

3.1.3 白云石充填物

古油藏白云岩的孔洞中充填大量他形白云石胶结物,以马鞍形白云石为主(图3k)。马鞍形白云石是指示热液作用的典型白云石矿物,通常晶体粗大,晶面多呈不规则鞍状,内部可见较多微裂缝(图3l),在正交光下具有典型波状消光特征。

3.2 微量元素特征

微量元素 Sr、Fe、Mn 常用于区分碳酸盐岩成岩作用的流体性质^[30-31]。Sr 元素主要赋存于海水中,随着碳酸盐岩受到成岩作用的改造而逐渐亏损。而 Fe 和 Mn 在海水中含量极低,主要与不同成岩流体的性质相关,随着埋藏深度的增加和成岩作用的增强含量逐渐增高^[30]。由表1可知古油藏白云岩中不同类型白云岩的 Sr 含量明显不同且总体很低,分布区间为 4.08~62.02 $\mu\text{g/g}$ (平均值为 18.44 $\mu\text{g/g}$)。不同类型白云岩的 Sr 含量不同,总体上与晶体大小和自形程度呈负相关。Mn/Sr 值一直被认为是反映成岩作用对碳酸盐岩改造程度的重要参数,当样品 Mn/Sr 值小于 2,认为其经历了较弱的成岩作用改造,其同位素组成保持了原始海水的同位素信息^[31]。雾心亮边晶粒白云岩的 Mn/Sr 值小于 2,泥—粉晶残余结构白云岩、他形一半自形细晶白云岩的 Mn/Sr 值主要介于 2~10,自形细晶白云岩、他形中一粗晶白云岩和马鞍形白云石的 Mn/Sr 值大于 10。这说明不同类型白云岩形成于不同的成岩阶段,经历了不同程度的后期成岩作用改造。Mn/Sr 值的变化主要与碳酸盐岩中 Mn 含量的增加有关(图4a),Sr 含量变化

对其影响相对较小(图4b)。这一特征表明,相对于随埋藏环境温度增高而逐步增强的成岩蚀变所造成的元素含量变化,不同成岩流体对白云岩微量元素的影响更大^[32]。古油藏同一类型白云岩的 Mn 和 Fe 含量的变化相关性较差,可用 Mn 元素含量来反映成岩环境埋深的特征^[31]。泥—粉晶残余结构白云岩、他形一半自形细晶白云岩、雾心亮边晶粒白云岩具有相对较低的 Mn 含量,表明白云石化成岩过程发生在准同生期—浅埋藏期^[31-32]。自形细晶白云岩、他形中一粗晶白云岩和马鞍形白云石中 Mn 相对富集,表明这3类白云岩(石)形成过程发生在深埋藏时期或受到富 Mn 流体的影响^[31-32]。

3.3 碳氧稳定同位素特征

碳氧稳定同位素是推测成岩矿物的成岩介质属性和温压条件的重要手段^[33-34]。一般认为,在高温、埋藏环境中,碳酸盐岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值对埋藏阶段环境温度变化相当敏感,两者通常呈负相关^[35],而碳同位素变化较小^[36]。不同类型碳酸盐岩的碳氧同位素组成具有明显的差异(表2,图5)。古油藏石灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 1.3‰~2.0‰,平均值为 1.6‰,与晚三叠世卡尼期海水背景值相同^[36];白云岩样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较为相近,介于 1.8‰~4.1‰,基本都高于石灰岩样品,表现出典型的海相碳酸盐岩特征^[37]。石灰岩样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值的范围为 -11.0‰~-6.6‰,平均值为 -9.7‰。白云岩样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值差距较大:雾心亮边晶粒白云岩具有最大的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,平均值为 0.1‰;泥—粉晶残余结构白云岩和他形一半自形细晶白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值较为相近,分别为 -4.3‰和 -4.9‰;他形中一粗晶白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值略微偏负,平均值为 -5.9‰;自形细晶白云岩和马鞍形白云石具有最小的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,平均值分别为 -9.5‰和 -9.6‰。

根据碳酸盐岩的古盐度 Z 值经验公式^[38]: $Z = 2.048(\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498(\delta^{18}\text{O} + 50)$, 计算得到古油藏碳酸盐岩样品的 Z 值(表2)。 Z 值大于 120 指示海相流体成因,小于 120 指示大气淡水流体成因。古油藏白云岩样品的古盐度 Z 值均高于 120,分布于 127.70~133.95,平均值为 130.68。泥—粉晶残余结构白云岩、他形一半自形细晶白云岩、他形中一粗晶白云岩和雾心亮边晶粒白云岩的古盐度 Z 值相对较高,平均值分别为 130.33、131.70、130.10 和 132.64。自形细晶白云岩和马鞍形白云石的古盐度 Z 值较低,平均值分别为 129.53 和 129.79。

表1 南羌塘隆鄂尼—昂达尔错—达卓玛古油藏白云岩微量元素含量参数表
Table 1 Trace element content parameters of dolomites of the Long'eni-Angdarco-Dazuoma palaeo-reservoir in southern Qiangtang Basin

样品号	样品类型	微量元素含量/(μg·g ⁻¹)			微量元素比值	
		Sr	Mn	Fe	Mn / Sr	Mn / Fe
XGXN-02	石灰岩	287.50	82.52	529.20	0.29	0.16
XGXN-03		268.30	67.50	567.00	0.25	0.12
XGXN-05-1		115.41	18.03	40.41	0.16	0.45
XGXN-25	微—粉晶残余结构白云岩	23.33	106.20	108.20	4.55	0.98
XGXN-26-1		27.44	64.32	91.71	2.34	0.70
XGXN-44		40.50	72.60	139.70	1.79	0.52
XGXN-17-1	他形—半自形细晶白云岩	26.15	99.40	296.70	3.80	0.34
XGXN-37		28.34	78.99	85.38	2.79	0.93
XGXN-46-1		20.98	140.40	206.30	6.69	0.68
XGXN-52		38.74	100.40	80.00	2.59	1.26
XGXN-07-1	自形细晶白云岩	14.06	290.70	431.20	20.68	0.67
XGXN-10-1		12.12	347.10	496.50	28.66	0.70
XGXN-12		12.60	336.30	476.60	26.69	0.71
XGXN-17-2		7.08	136.20	279.60	19.23	0.49
XGXN-18-1		12.03	314.40	703.80	26.13	0.45
XGXN-19-1		11.59	311.60	488.80	26.89	0.64
XGXN-23-1		11.95	317.60	506.60	26.58	0.63
XGXN-50-1		6.46	136.70	247.00	21.17	0.55
XGXN-19-2	他形中—粗晶白云岩	14.40	316.50	284.20	21.98	1.11
XGXN-23-2		13.90	317.70	380.70	22.86	0.83
XGXN-26-2		15.49	322.80	243.80	20.84	1.32
XGXN-35		13.73	274.43	251.50	19.99	1.09
XGXN-43-1		14.19	318.60	286.30	22.45	1.11
XGXN-43-2		15.43	334.60	237.50	21.69	1.41
XGXN-46-2		15.27	299.50	224.70	19.61	1.33
XGXN-50-2		16.29	306.47	230.50	18.81	1.33
ZRD-10	雾心亮边晶粒白云岩	60.17	17.69	198.70	0.29	0.09
ZRD-11		50.03	9.08	354.50	0.18	0.03
ZRD-13		62.02	24.84	80.90	0.40	0.31
XGXN-11-1	马鞍形白云石	10.70	312.90	342.80	29.24	0.91
XGXN-11-2		10.77	310.10	375.90	28.79	0.82
XGXN-17-3		11.38	341.90	427.25	30.04	0.80
XGXN-17-4		26.15	334.70	655.70	12.80	0.51
XGXN-18-2		9.61	284.17	284.53	29.57	1.00
XGXN-19-3		12.26	323.73	282.40	26.41	1.15
XGXN-20		14.32	309.30	298.30	21.60	1.04
XGXN-21		4.08	129.90	162.20	31.87	0.80
XGXN-22-1		4.28	122.60	163.50	28.67	0.75
XGXN-22-2		9.34	281.80	264.80	30.17	1.06
XGXN-22-3		10.77	327.70	276.70	30.43	1.18
XGXN-47		10.44	343.00	368.10	32.85	0.93
XGXN-49		9.72	330.57	337.60	34.01	0.98
XGXN-57		9.60	319.60	321.40	33.28	0.99

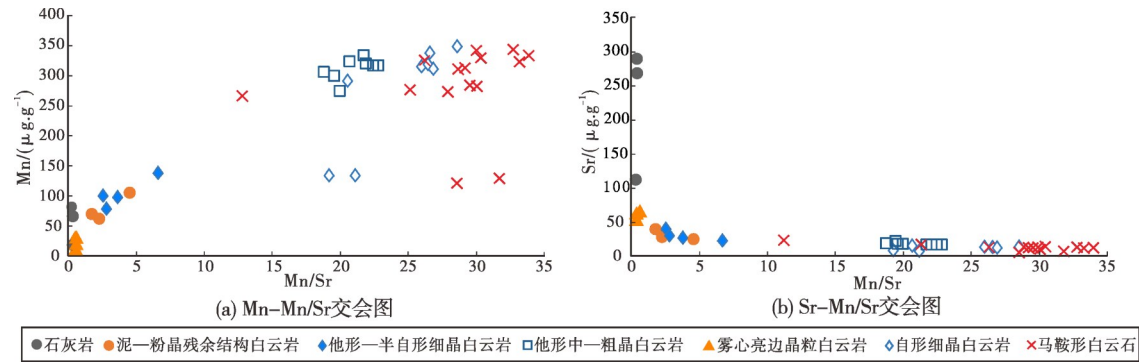


图4 南羌塘隆鄂尼—昂达尔错—达卓玛古油藏白云岩微量元素交会图

Fig. 4 Crossplots of trace element content parameters of dolomites of the Long'eni-Angdarco-Dazuoma palaeo-reservoir in southern Qiangtang Basin

表2 南羌塘隆鄂尼—昂达尔错—达卓玛古油藏白云岩稳定同位素参数表

Table 2 The stable isotopic parameters of dolomites of the Long'eni-Angdarco-Dazuoma palaeo-reservoir in southern Qiangtang Basin

样品号	样品类型	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}/\text{‰}$	古盐度Z值	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
XGXN-01	石灰岩	1.6	-10.1	125.55	0.707 76
XGXN-02		1.4	-10.5	124.94	
XGXN-05-1		1.3	-11.0	124.48	
XGXN-05-2		1.1	-6.6	126.27	
XGXN-06		2.0	-10.4	126.22	
XGXN-26-1	微-粉晶残余结构白云岩	1.8	-5.3	128.35	0.707 78
XGXN-43-3		3.2	-3.1	132.31	0.707 66
XGXN-14	他形一半自形细晶白云岩	4.0	-4.6	133.20	0.708 42
XGXN-28		3.8	-5.4	132.39	0.708 13
XGXN-37		3.3	-5.0	131.57	0.708 28
XGXN-46-1		2.9	-4.8	130.85	0.708 24
XGXN-52		2.7	-4.7	130.49	
XGXN-07-1	自形细晶白云岩	3.6	-9.3	130.04	
XGXN-07-2		3.1	-9.7	128.82	
XGXN-09		3.3	-9.5	129.33	
XGXN-10-1		3.8	-9.2	130.50	
XGXN-18-1		3.5	-10.4	129.29	
XGXN-22-4	他形中一粗晶白云岩	3.7	-8.9	130.45	0.708 26
XGXN-50-1		2.9	-9.9	128.31	
XGXN-26-2		2.6	-5.7	129.79	
XGXN-35		2.3	-5.7	129.17	
XGXN-43-1		3.5	-5.7	131.63	
XGXN-43-2	雾心亮边晶粒白云岩	3.4	-5.9	131.33	0.707 53
XGXN-46-2		2.1	-6.1	128.56	
ZRD-07		2.4	-0.1	132.17	
ZRD-10		2.4	0.2	132.31	
ZRD-11		3.2	0.2	133.95	
ZRD-13	马鞍形白云石	2.3	0.2	132.11	0.707 89
XGXN-10-2		2.7	-10.3	127.70	
XGXN-11-1		3.4	-10.1	129.23	
XGXN-18-2		3.3	-10.1	129.03	
XGXN-22-1		4.0	-8.4	131.31	
XGXN-47		4.1	-8.9	131.26	0.708 73
XGXN-60		3.8	-9.8	130.20	

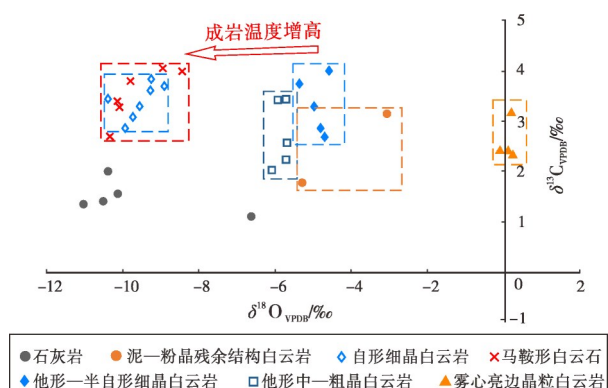


图5 南羌塘隆鄂尼—昂达尔错—达卓玛古油藏白云岩碳氧同位素组成交会图

Fig. 5 The $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^{13}\text{C}$ crossplot of dolomite of the Long'en-Angdarco-Dazuoma palaeo-reservoir in southern Qiangtang Basin

3.4 锶同位素特征

碳酸盐岩中的锶同位素组成不易受到沉积后生用的影响发生分馏,是追踪成岩流体的有效手段^[39–40]。在同一地质时代,全球海水的Sr同位素组成是一致的,因此白云岩Sr同位素组成与原岩沉积时期全球海水的差异是白云石化作用成岩流体地球化学特征的表现^[41]。古油藏石灰岩、泥—粉晶残余结构白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值落于晚三叠世全球海水范围内(0.707 56~0.707 81)^[42](图6),表明两者主要的成岩流体是海水。他形一半自形细晶白云岩、自形细晶白云岩、他形中一粗晶白云岩和马鞍形白云石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值均大于海水且分布范围较广,表明其白云石化作用流体可能为浓缩海水或受到多种成岩流体的影响^[37]。雾心亮边晶粒白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值最低,表明其成岩流体性质与其他白云岩不同。

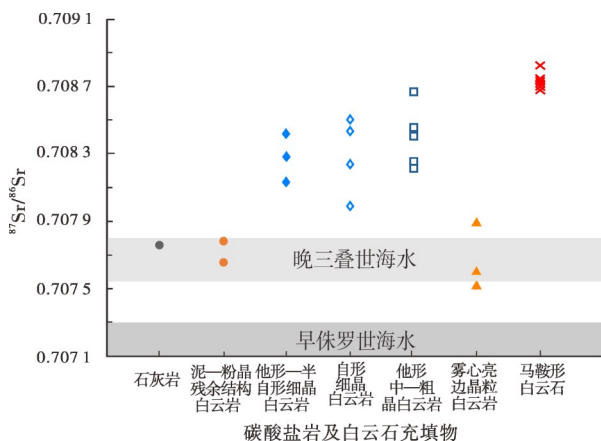


图6 南羌塘隆鄂尼—昂达尔错—达卓玛古油藏白云岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 分布图(海水Sr同位素数据据文献[42])

Fig. 6 The distribution of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of dolomites of the Long'en-Angdarco-Dazuoma palaeo-reservoir in southern Qiangtang Basin (Sr isotope data of seawater from reference [42])

3.5 稀土元素特征

稀土元素被认为是研究碳酸盐岩沉积流体、恢复矿物形成环境状态和古环境的重要地球化学手段^[43–46]。实验结果如表3所示,泥—粉晶残余结构白云岩、他形一半自形细晶白云岩和他形中一粗晶白云岩的 $\Sigma\text{REE}+\text{Y}$ 值较为相近,平均值分别为0.677 $\mu\text{g/g}$ 、0.790 $\mu\text{g/g}$ 和0.678 $\mu\text{g/g}$ 。雾心亮边晶粒白云岩的 $\Sigma\text{REE}+\text{Y}$ 平均值为1.020 $\mu\text{g/g}$ 。自形细晶白云岩和马鞍形白云石的 $\Sigma\text{REE}+\text{Y}$ 明显较高,平均值分别为2.652 $\mu\text{g/g}$ 和2.845 $\mu\text{g/g}$ 。古油藏白云岩稀土元素含量总体较低, $\Sigma\text{REE}+\text{Y}$ 值介于0.450~3.830 $\mu\text{g/g}$,远低于陆源碎屑的 $\Sigma\text{REE}+\text{Y}$ 含量(一般大于100 $\mu\text{g/g}$)^[43],表明此次碳酸盐岩稀土元素分析结果没有受到杂质的强烈影响。

通过对标准化后的稀土元素进行投图,可以得到实验样品的Masuda–Coryell图解^[46]。不同成岩流体中稀土元素的化学行为不同,根据稀土元素配分模式和轻重稀土元素替代比值 $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ 可以对碳酸盐岩成岩流体的性质进行判断^[45–46]。白云岩的稀土元素配分模式如图7所示:泥—粉晶残余结构白云岩(图7a)、他形一半自形细晶白云岩(图7b)和他形中一粗晶白云岩(图7c)具有类似的左倾稀土元素配分模式(平均 $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ 分别为0.55、0.43和0.53),表明这3类白云岩重稀土相对富集;自形细晶白云岩(图7d)和马鞍形白云石(图7e)的稀土配分模式呈明显的右倾(平均 $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ 为1.83和2.96),说明两者轻稀土相对富集;雾心亮边晶粒白云岩的稀土元素配分模式(图7f)近于平坦型(平均 $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ 为0.80),表明该类白云石轻、重稀土元素分馏不明显。

常用于研究碳酸盐岩成岩环境、流体性质的稀土元素异常指数包括Ce异常、Eu异常、Y/Ho值等参数^[47–48]。稀土元素Ce对沉积、成岩流体的氧化还原条件敏感,可以作为流体性质的判别标志^[47]。研究区白云岩样品的 δCe 值均小于1。泥—粉晶残余结构白云岩、他形一半自形细晶白云岩、他形中一粗晶白云岩和自形细晶白云岩的 δCe 较为相近,平均值分别为0.80、0.83、0.78、0.79;雾心亮边晶粒白云岩和马鞍形白云石的 δCe 相对较高,平均值分别为0.96和0.86。对海相碳酸盐岩,通常使用Pr异常值来对Ce异常进行验证:只有当 $\delta\text{Pr}<1$ 时, $\delta\text{Ce}>1$ 才反映真实的Ce正异常;当 $\delta\text{Pr}>1$ 时, $\delta\text{Ce}<1$ 反映Ce负

表3 南羌塘隆鄂尼—昂达尔错—达卓玛古油藏白云岩稀土元素含量参数表

Table 3 Rare earth element contents and parameters of dolomites of the Long'en-Angdarc-Dazhuoma palaeo-reservoir in southern Qiangtang Basin

样品号	样品类型	稀土元素及钕含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)														$\Sigma\text{REE} + \text{Y}$	δCe	δPr	δEu	Y/Ho	$\text{La}_\text{N} / \text{Yb}_\text{N}$	
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb							Lu
XGXN-26-1	微—粉晶 残余结构	0.127	0.182	0.032	0.126	0.024	0.006	0.026	0.005	0.029	0.281	0.006	0.018	0.004	0.022	0.003	0.89	0.66	1.19	1.05	48.81	0.42
XGXN-43-3		白云岩	0.069	0.142	0.018	0.054	0.010	0.003	0.014	0.002	0.015	0.115	0.003	0.009	0.001	0.007	0.001	0.46	0.93	1.22	1.15	37.70
XGXN-37	他形—半	0.057	0.121	0.015	0.065	0.009	0.003	0.013	0.001	0.015	0.125	0.002	0.010	0.002	0.012	0.002	0.45	0.95	1.00	1.07	53.95	0.35
XGXN-46-1	自形细晶	0.078	0.145	0.022	0.069	0.018	0.003	0.024	0.004	0.022	0.174	0.004	0.014	0.002	0.013	0.003	0.60	0.8	1.31	0.72	44.47	0.44
XGXN-52	白云岩	0.128	0.198	0.030	0.123	0.027	0.005	0.039	0.006	0.030	0.349	0.005	0.027	0.003	0.018	0.003	0.99	0.74	1.11	0.68	63.65	0.51
XGXN-11-3	自形	1.018	1.178	0.063	0.617	0.114	0.031	0.127	0.016	0.093	0.274	0.017	0.044	0.005	0.036	0.005	3.64	0.88	0.43	1.19	15.82	2.08
XGXN-17-2	细晶	0.266	0.183	0.014	0.167	0.033	0.010	0.032	0.004	0.025	0.069	0.005	0.014	0.001	0.015	0.002	0.84	0.54	0.44	1.39	13.19	1.27
XGXN-18-1	白云岩	0.913	1.335	0.100	0.562	0.105	0.032	0.097	0.012	0.065	0.164	0.014	0.036	0.005	0.032	0.005	3.48	0.95	0.68	1.50	11.94	2.13
XGXN-19-2		0.152	0.292	0.038	0.158	0.036	0.009	0.037	0.006	0.040	0.095	0.007	0.021	0.004	0.020	0.004	0.92	0.88	1.04	1.13	12.98	0.56
XGXN-19-4	他形	0.122	0.144	0.027	0.121	0.028	0.008	0.032	0.005	0.029	0.040	0.006	0.017	0.002	0.016	0.003	0.60	0.58	1.12	1.19	6.72	0.58
XGXN-28	中—粗晶 白云岩	0.096	0.177	0.023	0.097	0.025	0.005	0.024	0.004	0.024	0.092	0.006	0.019	0.003	0.016	0.002	0.61	0.87	1.01	0.53	16.15	0.44
XGXN-50-3		0.111	0.160	0.020	0.082	0.020	0.004	0.022	0.003	0.021	0.099	0.005	0.014	0.002	0.015	0.002	0.58	0.78	1.03	0.99	21.05	0.53
ZRD-10	雾心亮	0.250	0.504	0.058	0.193	0.032	0.009	0.041	0.006	0.030	0.242	0.007	0.023	0.003	0.020	0.003	1.42	0.96	1.10	1.17	33.71	0.93
ZRD-13	边晶粒 白云岩	0.093	0.193	0.023	0.092	0.014	0.004	0.021	0.003	0.016	0.132	0.004	0.011	0.002	0.010	0.002	0.62	0.96	1.01	0.97	33.38	0.66
XGXN-11-1		0.945	1.032	0.055	0.501	0.087	0.041	0.093	0.011	0.058	0.197	0.013	0.033	0.005	0.026	0.005	3.10	0.84	0.45	2.13	15.06	2.72
XGXN-11-2		1.250	1.458	0.068	0.532	0.084	0.048	0.081	0.010	0.054	0.182	0.010	0.025	0.003	0.020	0.003	3.83	0.91	0.45	2.72	18.52	4.64
XGXN-17-3	马鞍形 白云石	0.725	0.827	0.065	0.357	0.104	0.150	0.080	0.033	0.049	0.131	0.033	0.047	0.013	0.040	0.025	2.68	0.79	0.70	7.76	4.01	1.32
XGXN-18-2		0.464	0.533	0.042	0.230	0.044	0.037	0.040	0.006	0.032	0.089	0.006	0.015	0.003	0.011	0.002	1.55	0.79	0.71	4.19	14.62	3.25
XGXN-18-3		0.805	1.110	0.073	0.460	0.083	0.118	0.087	0.010	0.058	0.188	0.012	0.029	0.004	0.021	0.004	3.06	0.95	0.60	6.49	15.70	2.88

异常^[47]。据此判断,泥—粉晶残余结构白云岩、他形一半自形细晶白云岩、他形中一粗晶白云岩和雾心亮边晶粒白云岩具有不同程度的Ce负异常。

稀土元素Eu的含量受沉积流体稀土组成与沉积后成岩流体改造的共同影响^[49-50]。Eu元素在自然界中存在Eu²⁺与Eu³⁺2种价态,前者更容易进入碳酸盐矿物晶格中^[49]。温度越高Eu²⁺的稳定性越强,此时析出的碳酸盐矿物的Eu正异常越明显,因此白云岩中的Eu正异常被当作是热液成岩流体影响的表现^[50]。自形细晶白云岩和马鞍形白云石表现出明显的Eu正异常,表明两者形成温度相对较高。而其他类型的白云岩部分样品表现出弱Eu正异常

(δEu 接近于1),说明随着埋藏过程的进行,古油藏白云岩不可避免地受到了埋藏环境温度升高的影响。

Y/Ho值常被用于判断碳酸盐岩的成岩流体性质^[51-52]。随着埋深增加金属氧化物逐渐溶解,流体中的Ho相对Y增多,使得Y/Ho值下降^[51]。因此,通常认为海相开放环境中碳酸盐矿物的Y/Ho值较高,而埋藏封闭环境中形成的矿物的Y/Ho值较低^[52]。本次实验中,泥—粉晶残余结构白云岩、他形一半自形细晶白云岩的Y/Ho值较高,而自形细晶白云岩、他形中一粗晶白云岩、马鞍形白云石的Y/Ho值较低。

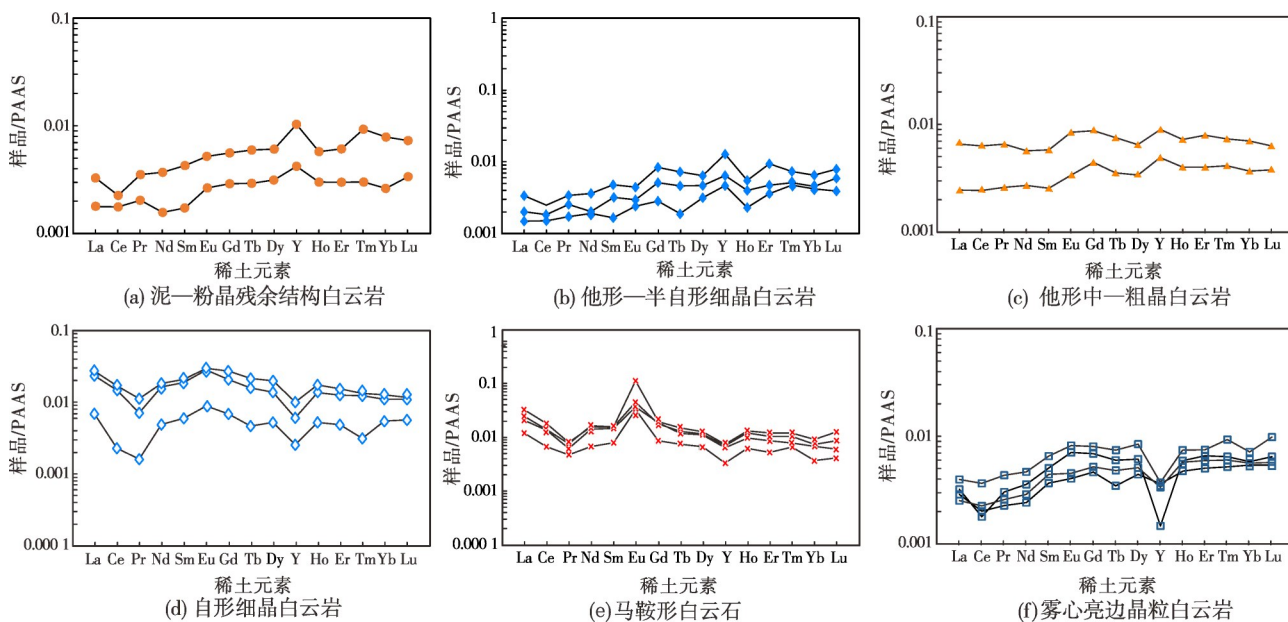


图7 南羌塘隆鄂尼—昂达尔错—达卓玛古油藏白云岩稀土元素配分模式图

Fig. 7 PAAS-normalized REE distribution patterns of dolomites of the Long'en-Angdarco-Dazuoma palaeo-reservoir in southern Qiangtang Basin

4 白云岩成因与储层演化

4.1 白云岩成因模式

单一地球化学指标用于白云岩成岩分析时往往具有多解性,如 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值同时受到流体同位素组成、温度、盐度、微生物活动的影响^[37]。因此,在讨论白云石化模式时需要综合分析地球化学指标和岩石学特征。

泥—粉晶残余结构白云岩 镜下具有晶体粒径小、晶型差、保留有原始藻灰岩沉积构造的特征,并具有较高的Sr含量、较低的Mn和Fe含量、较低的Mn/Sr值,这些均表明其主要形成于准同生期^[37]。

此类白云岩的稀土配分模式为左倾,具有Ce负异常和高Y/Ho值,符合海水驱动白云石化作用产物的特征,并且其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与晚三叠世沉积水体相似,说明白云石化流体主要来自同生期—准同生期海水。一般认为,在同一成岩流体中形成的白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值高于方解石,差值约为3‰,并且蒸发作用会使得海水中的 ^{18}O 富集,此时形成白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值会明显高于石灰岩围岩^[30, 35]。而泥—粉晶残余结构白云岩的古盐度值较低, $\delta^{18}\text{O}$ 值与围岩石灰岩也比较接近,不符合蒸发海水驱动白云石化作用产物的特征,并且在古油藏白云岩地层中也未发现蒸发矿物,这些均说明泥—粉晶残余结构白

云岩成岩环境为正常海水。而在此类白云岩中发现的球形、簇状白云石(图3d)则说明存在的微生物活动促进了白云石化作用的进行^[53]。能谱分析结果也表明,微生物球形白云石的Mg/Ca值低于周边白云石(图8a),指示其形成于Mg²⁺浓度相对较低的成岩流体环境中。综上所述,泥—粉晶残余结构白云岩是准同生期微生物白云石化作用的产物。

他形一半自形细晶白云岩 白云石晶体粒径较小、晶型较差,说明此类白云岩是快速白云石化作用的产物^[37]。他形一半自形细晶白云岩和泥—粉晶残余结构白云岩的稀土元素特征类似,表明其形成过程并未脱离海水的影响。但其Mn含量、Mn/Sr值略高于泥—粉晶残余结构白云岩,表明此类白云岩形成于浅埋藏环境^[37]。并且此类白云岩的Sr含量和⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值也高于泥—粉晶残余结构白云岩,而水体中的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值和Sr含量同步增高的特征,则说明其成岩流体为蒸发海水^[35]。此外,他形一半自形细晶白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(2.7‰~4.0‰)相对于石灰岩围岩(1.1‰~2.0‰)偏移的程度和较高的古盐度Z值(130.49~133.20)也符合蒸发海水驱动白云石化作用产物的特征^[54]。白云岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值正向偏移程度较低的原因可能是此类白云岩形成时环境温度相对较高,造成了氧同位素的分馏^[35]。综合上述分析,他形一半自形细晶白云岩为浅埋藏阶段回流渗透白云石化作用的产物。

他形中—粗晶白云岩 白云石晶体自形程度较差、晶体较大且相对纯净、呈镶嵌接触,表明此类白云岩是在过饱和的白云石化流体作用下形成的。此类白云岩具有和他形一半自形细晶白云岩类似的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值、Ce负异常和稀土元素配分模式,表明两者受控于相同的成岩流体。但相比于他形一半自形细晶白云岩,他形中—粗晶白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值负向偏移、Y/Ho值和Sr含量相对更低、Mn和Fe含量更高并且具有弱Eu正异常,则表明此类白云岩形成于温度较高的浅埋藏环境中^[30-32]。此类白云岩的古盐度Z值(平均值130.10)略低于他形一半自形细晶白云岩(Z值131.70),表明在浅埋藏体系中,随着白云石化作用的进行,流体中的离子浓度逐渐降低,白云石化速度相对减慢,进而有利于白云石晶体生长。综合上述分析,他形中—粗晶白云岩是在浅埋藏环境中回流渗透白云石化作用的产物。

自形细晶白云岩 白云石晶体粒径较小、晶体

自形程度高且边界较为平直,表明此类白云岩形成时层间流体的盐度较低,白云石化能力有限,与接触围岩水—岩反应速度较慢。此类白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值负向偏移、具有Eu正异常、Y/Ho值较低和稀土元素配分模式为右倾,都表明其形成环境温度较高^[35, 51]。此外,自形细晶白云岩的 $\Sigma\text{REE}+\text{Y}$ 值、Mn和Fe含量极高且相关性较好,说明其成岩流体接受了在高温环境中以离子形式从黏土矿物、铁泥质杂质中析出的Mn²⁺、Fe²⁺和稀土元素^[37]。综合以上分析,自形细晶白云岩成因为中—深埋藏环境中的高温孔隙水驱动的埋藏白云石化作用。

雾心亮边晶粒白云岩 具有和其他类型白云岩完全不同的岩石学、地球化学特征。前人研究认为雾心亮边晶粒白云岩是混合水白云石化作用的产物,雾心由在混合水环境中未被完全溶蚀的方解石、文石或早期白云石组成,而亮边则是在相同成岩环境中围绕雾心沉淀的较为纯净的白云石^[55-56]。本次研究在雾心亮边白云岩晶体中并未发现明显的沉积间断,表明其形成过程连续(图3i, 3j)。同时,能谱测得此类白云石不同区域的Mg/Ca值也具有连续过渡的特征(图8b):雾心部分含有杂质,Mg/Ca值较低(1.20);过渡部分Mg/Ca值最高(1.23~1.26),表明此阶段白云石化作用逐渐减缓,白云石晶体中杂质含量减少;亮边部分的Mg/Ca值最低(1.14),说明此时成岩流体中的Mg²⁺浓度随白云石化进行而逐渐下降。Mg/Ca值的变化反映了雾心亮边白云岩形成于单次白云石化作用,符合混合水白云石化解释模型。雾心亮边晶粒白云岩Sr含量较高,Mn、Fe含量较低,Mn/Sr值极低,说明其形成环境为近地表,并且形成后受成岩蚀变影响较小^[37]。 $\delta^{18}\text{O}$ 值正向偏移和快速白云石化作用来不及排出的石灰岩杂质形成的雾心,都表明此类白云岩的形成受到了高度浓缩海水的影响。平坦型稀土配分模式(图7f)呈直线形,说明此类白云岩在形成时受到了大气淡水的影响^[57]。此外,雾心亮边晶粒白云岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值低于晚三叠世海水背景值,表明有低⁸⁷Sr/⁸⁶Sr的成岩流体共同参与了白云岩的形成^[42]。结合年代学研究确认此类白云岩形成于早侏罗世^[17],认为雾心亮边晶粒白云岩的形成同时受到了早侏罗世蒸发海水和大气淡水的共同影响,是埋藏后抬升阶段混合水白云石化作用的产物。

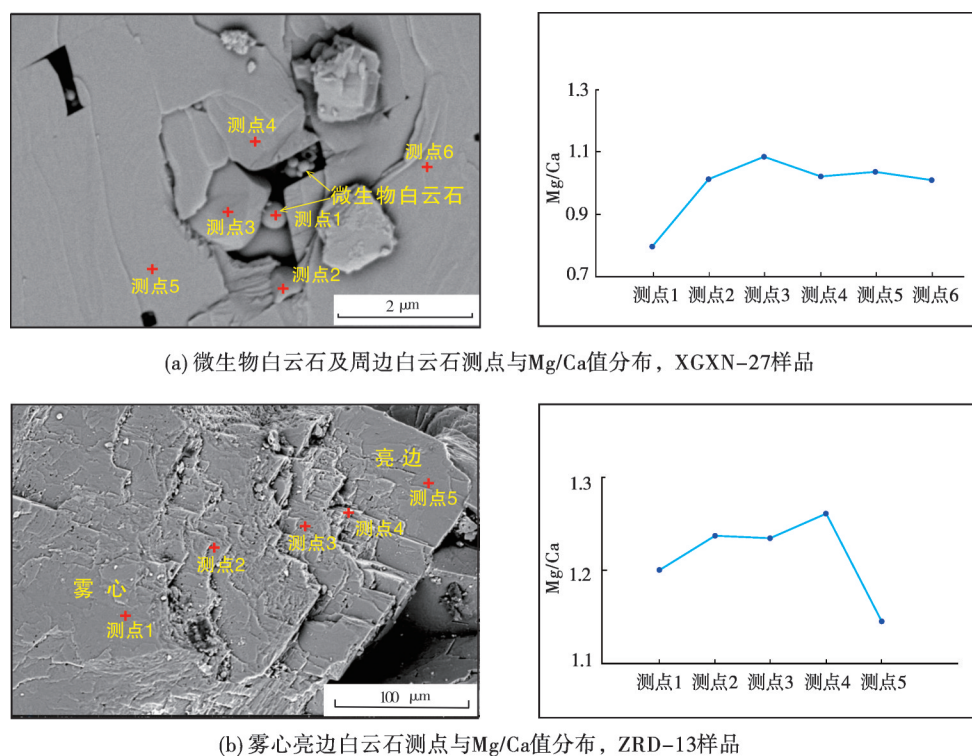


图8 南羌塘隆鄂尼—昂达尔错—达卓玛古油藏白云岩扫描电镜背散射图像与Mg/Ca值分布图

Fig. 8 Backscatter scanning images and Mg/Ca distribution of dolomites of the Long'en-Angdarco-Dazuoma palaeo-reservoir in southern Qiangtang Basin

马鞍形白云石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值远高于晚三叠世海水的背景值,并且差值超过 10^{-5} 数量级,表明此类白云石受到了含有壳源 Sr 的外来成岩流体的影响^[35]。此类白云石还具有明显 $\delta^{18}\text{O}$ 负向偏移、Eu 正异常、低 Y/Ho 值和重稀土亏损的特征,符合热液流体的典型特征^[58-59]。在热液白云石化体系中,热液流体主要通过穿过碎屑岩地层捕获放射性 Sr,进而获得高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值;与浓缩海水不同,热液流体虽然具有较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值,但 Sr 元素含量相对较低,Mn 和 Fe 的含量较高^[60]。马鞍形白云石具有最高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值和 Mn 含量,最低的 Sr 含量,并且其赋存的碳酸盐岩的相邻地层均以碎屑岩沉积为主,因此推测其白云石化流体为穿过碎屑岩地层与古油藏地层接触的埋藏期热液。在封闭体系中,碳酸盐岩的碳同位素分馏以 120 °C 为界,在环境温度相对较低时, $\delta^{13}\text{C}$ 值随温度增加而逐渐降低,而环境温度较高时则逐渐升高^[61]。虽然碳酸盐岩的碳同位素随温度变化而发生分馏的幅度较小,但仍可以造成 $\delta^{13}\text{C}$ 值小幅度 (-1‰ ~ 2‰) 的增减^[61]。马鞍形白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与自形细晶白云岩相

似,高出石灰岩围岩 2‰ ~ 3‰ ,反映了在异常高温作用下白云石内重碳逐渐富集的化学行为。综合上述分析,马鞍形白云石是热液白云石化作用的产物。

4.2 白云石化-储层演化耦合关系

对南羌塘盆地古油藏白云岩进行的原位 U-Pb 同位素定年结果表明,他形一半自形细晶白云岩和他形中一粗晶白云岩形成于晚三叠世诺利期 (216.2 ± 6.1 Ma 和 210.1 ± 9.4 Ma);自形细晶白云岩形成于早侏罗世普林斯巴期 (192.7 ± 6.0 Ma 和 186.6 ± 3.1 Ma);雾心亮晶晶白云岩也形成于普林斯巴期 (185.5 ± 3.8 Ma 和 182.7 ± 5.8 Ma),略晚于自形细晶白云岩^[17]。而马鞍形白云石的形成时间 (181 ± 18 Ma 和 161 ± 23 Ma)则表明大规模白云石化作用发生后有 2 期热液活动事件^[21]。再结合羌塘盆地的地质构造背景、白云岩的岩石学特征和地球化学特征,可以确定古油藏原始碳酸盐岩在沉积后至少经历了埋藏→抬升→再埋藏→再抬升的过程,伴随着多种流体驱动的白云石化过程,储集空间也受到了改造。

晚三叠世早期,受新特提斯洋新一轮扩张的影响,南羌塘拗陷由隆起区逐渐转变为裂陷-拗陷盆地^[1],水动力条件较强,以沉积生物礁滩相藻叠层石灰岩、生物碎屑灰岩、泥晶灰岩为主。在局部区域,微生物参与了早期白云石化过程,诱导了泥—粉晶残余结构白云岩的形成。虽然在泥—粉晶残余结构白云岩中没有观察到大量孔隙,但早期白云石化作用对储层的形成仍具有积极影响。早期白云石化将文石和方解石改造为白云石,增强了碳酸盐岩的抗压实能力,为成岩流体保存了通道,有利于埋藏后成岩作用对储集空间进行改造。同时,早期白云岩短时间快速形成,也有利于原生孔隙的保存。

晚三叠世诺利期至瑞替期,羌塘盆地发生进一步海侵,主要沉积海相细碎屑岩地层^[6]。碳酸盐沉积进入浅埋藏时期,受控于向下渗透的浓缩海水影响,原始石灰岩沉积和部分残余结构白云岩发生大规模白云石化形成了他形一半自形细晶白云岩和他形中一粗晶白云岩。在封闭环境中,白云石化作用可以显著地减少岩石的体积,形成大量的晶间孔隙^[62]。薄片中也明显观察到残余油气主要充填于他形中一粗晶白云岩的晶间孔隙中(图3h),表明此时期是储层形成的重要阶段。早侏罗世辛涅缪尔期,碳酸盐岩沉积进入中—深埋藏时期,环境温度和压力随埋深的增大而升高,促使石灰岩和部分早期白云岩在高温孔隙水的作用下发生埋藏白云石化作用,形成自形细晶白云岩,发育了大量晶间孔,改善了储层物性。

早侏罗世普林斯巴期,碳酸盐岩地层被重新抬升到了近地表。在这个阶段,发生混合水白云石化作用形成雾心亮边晶粒白云岩,同时白云岩受到大气淡水的淋滤作用形成了较多的粒间溶蚀扩大孔(图3i)。随着南羌塘盆地继续接受沉积,古油藏白云岩重新进入埋藏阶段,该阶段白云岩持续受到热液溶蚀作用,形成大量次生溶孔、溶洞,并部分被马鞍形白云石所充填(图3k,3l)。至晚白垩世—古近纪,白云岩地层在逆冲推覆及构造隆升的作用下抬升至地表形成古油藏带^[27]。

综上所述,南羌塘古油藏储集空间演化与白云石化作用的耦合关系明显,准同生微生物白云石化作用、浅埋藏回流渗透白云石化作用和重结

晶作用、抬升时期发生的大气淡水淋滤和后期热液溶蚀作用产生了大量的次生孔隙,改造了古油藏碳酸盐岩地层的储集物性,是形成优质储层的重要机制。

古油藏白云岩的成因机制、成岩过程表明南羌塘盆地上三叠统碳酸盐岩是良好的储层,并且在晚三叠世诺利期形成大规模储层,与上三叠统烃源岩(扎那组黑色泥岩,在早侏罗世—中侏罗世早期进入生烃门限^[1])及上覆盖层(雀莫错组硬石膏盖层、夏里组含膏泥质岩盖层^[1])组成了匹配良好的生储盖组合,可作为羌塘盆地油气勘探有利目的层之一。

5 结 论

(1)南羌塘古油藏白云岩主要包括:泥—粉晶残余结构白云岩、他形一半自形细晶白云岩、自形细晶白云岩、他形中一粗晶白云岩、雾心亮边晶粒白云岩。此外,马鞍形白云石作为充填物广泛发育在古油藏白云岩中。

(2)南羌塘古油藏白云岩存在多种成因模式。泥—粉晶残余结构白云岩形成于准同生阶段,与微生物白云石化作用有关,成岩流体盐度相对较低。他形一半自形细晶白云岩和他形中一粗晶白云岩形成于浅埋藏阶段,与蒸发海水回流、下渗有关,是渗透回流白云石化作用的产物。自形细晶白云岩形成于中—深埋藏阶段,与高温环境下黏土矿物、铁泥质杂质的转化有关,是埋藏白云石化作用的产物。雾心亮边晶粒白云岩的成因为抬升阶段的混合水白云石化作用。马鞍形白云石是热液白云石化作用的产物。

(3)南羌塘古油藏储集空间演化与白云石化作用的耦合关系明显。封闭系统中的回流渗透白云石化作用、热液溶蚀作用及开放系统中的大气淡水淋滤作用是羌塘盆地古油藏白云岩优质储层形成的重要成岩机理。羌塘盆地上三叠统碳酸盐岩是良好的储层,可作为油气勘探有利目的层之一。

致谢 国家能源碳酸盐岩油气重点实验室沈安江、胡安平、梁峰、罗宪婴、韦东晓、陈薇、徐佩等各位老师和西南石油大学罗青云、张豪薇、胡方知、王莹、聂应等同学对本次研究工作给予了指导和帮助,谨致以衷心的感谢!

参考文献

- [1] 王剑, 付修根. 论羌塘盆地沉积演化[J]. 中国地质, 2018, 45(2): 237-259.
WANG Jian, FU Xiugen. Sedimentary evolution of the Qiangtang Basin[J]. *Geology in China*, 2018, 45(2): 237-259.
- [2] 王剑, 付修根, 谭富文. 羌塘盆地油气资源战略调查[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
WANG Jian, FU Xiugen, TAN Fuwen. Strategic investigation of oil and gas resources in the Qiangtang Basin[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [3] 夏国清, 季长军, 杨伟, 等. 南羌塘坳陷中侏罗统布曲组油藏带流体包裹体特征与油气充注历史[J]. 石油学报, 2016, 37(10): 1247-1255.
XIA Guoqing, JI Changjun, YANG Wei, et al. Fluid inclusions characteristics and hydrocarbon charging history of oil reservoir belt in the Mid-Jurassic Buqu Formation, southern Qiangtang Depression[J]. *Acta petrolei sinica*, 2016, 37(10): 1247-1255.
- [4] FU Xiugen, WANG Jian, TAN Fuwen, et al. New insights about petroleum geology and exploration of Qiangtang Basin, northern Tibet, China: a model for low-degree exploration[J]. *Marine and petroleum geology*, 2016, 77: 323-340.
- [5] 王成善. 西藏羌塘盆地地质演化与油气远景评价[M]. 北京: 地质出版社, 2001.
WANG Chengshan. The geological evolution and prospective oil and gas assessment of the Qiangtang Basin in northern Tibetan Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001.
- [6] 王剑, 付修根, 沈利军, 等. 论羌塘盆地油气勘探前景[J]. 地质论评, 2020, 66(5): 1091-1113.
WANG Jian, FU Xiugen, SHEN Lijun, et al. Prospect of the potential of oil and gas resources in Qiangtang Basin, Xizang (Tibet)[J]. *Geological review*, 2020, 66(5): 1091-1113.
- [7] 朱井泉, 李永铁. 藏北羌塘盆地侏罗系白云岩类型、成因及油气储集特征[J]. 古地理学报, 2000, 2(4): 30-42.
ZHU Jingquan, LI Yongtie. Types, Origin and reservoir characteristics of the Jurassic dolostones in the Qiangtang Basin, North Tibet[J]. *Journal of palaeogeography*, 2000, 2(4): 30-42.
- [8] 刘建清, 陈文斌, 杨平, 等. 羌塘盆地中央隆起带南侧隆额尼一昂达尔错古油藏白云岩地球化学特征及成因意义[J]. 岩石学报, 2008, 24(6): 1379-1389.
LIU Jianqing, CHEN Wenbin, YANG Ping, et al. The Longeni-Angdanreco paelo-oil dolomite geochemical characteristics in southern part of the central uplift zone of Qiangtang Basin and it's significance [J]. *Acta petrologica sinica*, 2008, 24(6): 1379-1389.
- [9] 伊海生, 高春文, 张小青, 等. 羌塘盆地双湖地区古油藏白云岩储层的显微成岩组构特征及意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, 31(6): 611-615.
YI Haisheng, GAO Chunwen, ZHANG Xiaoqing, et al. Microscopic diagenetic fabrics of dolomite reservoir from Shuanghu paleo-oil pool of Qiangtang Basin and its petroleum exploration implications [J]. *Journal of Chengdu University of Technology(science & technology edition)*, 2004, 31(6): 611-615.
- [10] 陈文彬, 杨平, 张予杰, 等. 南羌塘盆地扎仁古油藏白云岩储层特征及成因研究[J]. 沉积与特提斯地质, 2006, 26(2): 42-46.
CHEN Wenbin, YANG Ping, ZHANG Yujie, et al. Dolostone reservoirs and their genesis in the Zaring oil pool in southern Qiangtang Basin[J]. *Sedimentary geology and Tethyan geology*, 2006, 26(2): 42-46.
- [11] 伊海生, 陈志勇, 季长军, 等. 羌塘盆地南部地区布曲组砂糖状白云岩埋藏成因的新证据[J]. 岩石学报, 2014, 30(3): 737-746.
YI Haisheng, CHEN Zhiyong, JI Changjun, et al. New evidence for deep burial origin of sucrosic dolomites from Middle Jurassic Buqu Formation in southern Qiangtang Basin[J]. *Acta petrologica sinica*, 2014, 30(3): 737-746.
- [12] 张帅, 夏国清, 伊海生, 等. 羌塘盆地南部隆鄂尼地区布曲组鞍形白云石成因[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(4): 483-489.
ZHANG Shuai, XIA Guoqing, YI Haisheng, et al. Origin of saddle dolomites from the Buqu Formation of Longeni area in southern Qiangtang Basin[J]. *Oil & gas geology*, 2016, 37(4): 483-489.
- [13] 田康志, 季长军, 伊海生, 等. 南羌塘坳陷扎仁地区中侏罗统布曲组晶粒白云岩成因分析[J]. 中国地质, 2019, 46(2): 398-406.
TIAN Kangzhi, JI Changjun, YI Haisheng, et al. Origin of grained dolomite from the Buqu Formation of Zaring area in southern Qiangtang Depression [J]. *Geology in China*, 2019, 46(2): 398-406.
- [14] 季长军, 陈程, 吴珍汉, 等. 羌塘盆地中侏罗统砂糖状白云岩流体包裹体碳-氧同位素分析及白云岩成因机制讨论[J]. 地质论评, 2020, 66(5): 1186-1198.
JI Changjun, CHEN Cheng, WU Zhenhan, et al. Carbon and oxygen isotopes analysis of the fluid inclusions in Middle Jurassic saccharoidal dolostone of Qiangtang Basin and discussion on the genesis of dolostone [J]. *Geological review*, 2020, 66(5): 1186-1198.
- [15] 万友利, 王剑, 付修根, 等. 羌塘盆地南坳陷古油藏带中侏罗统布曲组白云岩元素地球化学特征及意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2018, 38(2): 23-35.
WAN Youli, WANG Jian, FU Xiugen, et al. Trace element geochemical signatures and significance of the Buqu Formation dolostones in southern Qiangtang Depression [J]. *Sedimentary geology and Tethyan geology*, 2018, 38(2): 23-35.
- [16] 李鑫, 伊海生, 金峰, 等. 羌塘盆地隆鄂尼一昂达尔错古油藏带白云岩成岩特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2018, 45(2): 142-153.
LI Xin, YI Haisheng, JIN Feng, et al. Diagenetic characteristics of dolomite in the Long'eni-Angdar Co ancient reservoir, Qiangtang Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology(science & technology edition)*, 2018, 45(2): 142-153.
- [17] ZHANG Jian, WANG Jian, ZHENG Bo, et al. Age assignment of dolomite in palaeo-reservoirs of the Qiangtang Basin:

- new evidence from palaeontology and carbonate in situ U-Pb dating[J]. *Marine and petroleum geology*, 2023, 158: 106545.
- [18] SHEN Lijun, ZHANG Jianyong, XIONG Shaoyun, et al. Evaluation of the oil and gas preservation conditions, source rocks, and hydrocarbon-generating potential of the Qiangtang Basin: new evidence from the scientific drilling project [J]. *China geology*, 2023, 6(2): 187-207.
- [19] 王剑, 王忠伟, 付修根, 等. 青藏高原羌塘盆地首口油气勘探井(QK-1)新发现[J]. *科学通报*, 2022, 67(3): 321-328.
- WANG Jian, WANG Zhongwei, FU Xiugen, et al. New discoveries on the first petroleum scientific drilling (QK-1) of the Qiangtang Basin, Tibetan Plateau [J]. *Chinese science bulletin*, 2022, 67(3): 321-328.
- [20] 王剑, 张豪薇, 张健, 等. 论羌塘含油气盆地关键地层划分对比问题[J]. *海相油气地质*, 2024, 29(1): 17-29.
- WANG Jian, ZHANG Haowei, ZHANG Jian, et al. Advances in division and correlation of stratigraphy in the oil-bearing Qiangtang Basin, North Tibet [J]. *Marine origin petroleum geology*, 2024, 29(1): 17-29.
- [21] WANG Zhongwei, WANG Jian, FU Xiugen, et al. Sedimentary successions and onset of the Mesozoic Qiangtang rift basin (northern Tibet), Southwest China: insights on the Paleo- and Meso-Tethys evolution [J]. *Marine and petroleum geology*, 2019, 102: 657-679.
- [22] 王永胜, 张树岐, 谢元和, 等. 1:25 万昂达尔错幅区域地质调查报告[R]. 长春: 吉林省地质调查院, 2006.
- WANG Yongsheng, ZHANG Shuqi, XIE Yuanhe, et al. Regional geological report (1: 250, 000) for Angdar Co [R]. Changchun: Jilin Institute of Geology and Mineral Resources, 2006.
- [23] 刘若涵, 何碧竹, 郑孟林, 等. 羌塘盆地东部晚三叠世—侏罗纪构造-沉积演化[J]. *岩石学报*, 2019, 35(6): 1857-1874.
- LIU Ruohan, HE Bizhu, ZHENG Menglin, et al. Tectonic-sedimentary evolution during Late Triassic-Jurassic period in the eastern part of the Qiangtang Basin, Tibet [J]. *Acta petrologica sinica*, 2019, 35(6): 1857-1874.
- [24] MANSOUR A, XIA Guoqing, FU Xiugen, et al. Sea level changes and sequence stratigraphy of the Lower-Middle Jurassic Quse and Sewa Formations in the Qiangtang Basin, Central Tibet: geochemical and palynological perspectives [J]. *International geology review*, 2023, 65(18): 2879-2899.
- [25] 陈明, 孙伟, 陈浩, 等. 西藏南羌塘鄂斯玛地区中侏罗统布曲组沉积特征及油气地质意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 2020, 40(3): 96-101.
- CHEN Ming, SUN Wei, CHEN Hao, et al. Sedimentary characteristics and oil-gas geological significance of the Middle Jurassic Buqu Formation in the Ersma area, southern Qiangtang Basin, Tibet [J]. *Sedimentary geology and Tethyan geology*, 2020, 40(3): 96-101.
- [26] 张建勇, 许强, 曹雨, 等. 西藏东巧—北拉地区班公湖—怒江洋俯冲闭合及对南羌塘盆地演化的制约[J]. *海相油气地质*, 2024, 29(1): 1-16.
- ZHANG Jianyong, XU Qiang, CAO Yu, et al. The subduction and closure of Bangong Lake-Nujiang Ocean in the Dongqiao-Beila area, Tibet and its constraints on the evolution of southern Qiangtang Basin [J]. *Marine origin petroleum geology*, 2024, 29(1): 1-16.
- [27] 吴珍汉, 刘志伟, 赵珍, 等. 羌塘盆地隆鄂尼—昂达尔错古油藏逆冲推覆构造隆升[J]. *地质学报*, 2016, 90(4): 615-627.
- WU Zhenhan, LIU Zhiwei, ZHAO Zhen, et al. Thrust and uplift of the Lung'erni-Angdar Co paleo-oil reservoirs in the Qiangtang Basin [J]. *Acta geologica sinica*, 2016, 90(4): 615-627.
- [28] 唐友军, 张欣越, 季长军, 等. 南羌塘盆地侏罗系砂糖状白云岩古油藏油源研究: 来自芳烃化合物和单体烃碳同位素的证据[J]. *长江大学学报(自科版)*, 2022, 19(2): 1-11.
- TANG Youjun, ZHANG Xinyue, JI Changjun, et al. Crude oil source of granulated dolomite paleo-reservoir from the Jurassic strata in the south Qiangtang Basin: evidence from carbon isotopes of aromatic compounds and monomeric hydrocarbons [J]. *Journal of Yangtze University(natural science edition)*, 2022, 19(2): 1-11.
- [29] VAN KRANENDONK M J, WEBB G E, KAMBER B S. Geological and trace element evidence for a marine sedimentary environment of deposition and biogenicity of 3.45 Ga stromatolitic carbonates in the Pilbara Craton, and support for a reducing Archaean ocean [J]. *Geobiology*, 2003, 1(2): 91-108.
- [30] 王利超, 胡文瑄, 王小林, 等. 白云岩化过程中铈含量变化及铈同位素分馏特征与意义[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(4): 464-472.
- WANG Lichao, HU Wenxuan, WANG Xiaolin, et al. Variation of Sr content and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope fractionation during dolomitization and their implications [J]. *Oil & gas geology*, 2016, 37(4): 464-472.
- [31] ZHOU Haijun, CHUN Xi, LÜ Changwei, et al. Geochemical characteristics of rare earth elements in windowsill dust in Baotou, China: influence of the smelting industry on levels and composition [J]. *Environmental science: processes & impacts*, 2020, 22(12): 2398-2405.
- [32] SU Ao, CHEN Honghan, FENG Yuexing, et al. In situ U-Pb dating and geochemical characterization of multi-stage dolomite cementation in the Ediacaran Dengying Formation, central Sichuan Basin, China: constraints on diagenetic, hydrothermal and paleo-oil filling events [J]. *Precambrian research*, 2022, 368: 106481.
- [33] 沈安江, 罗宪婴, 胡安平, 等. 从准同生到埋藏环境的白云石化路径及其成储效应[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(4): 637-647.
- SHEN Anjiang, LUO Xianying, HU Anping, et al. Dolomitization evolution and its effects on hydrocarbon reservoir formation from penecontemporaneous to deep burial environment [J]. *Petroleum exploration and development*, 2022, 49(4): 637-647.

- [34] 郑永飞, 徐宝龙, 周根陶. 矿物稳定同位素地球化学研究[J]. 地学前缘, 2000, 7(2): 299-320.
ZHENG Yongfei, XU Baolong, ZHOU Gentao. Geochemical studies of stable isotopes in minerals[J]. Earth science frontiers, 2000, 7(2): 299-320.
- [35] 朱光有, 李茜. 白云岩成因类型与研究方法进展[J]. 石油学报, 2023, 44(7): 1167-1190.
ZHU Guangyou, LI Qian. Progress in genetic types and research methods of dolomite[J]. Acta petrolei sinica, 2023, 44(7): 1167-1190.
- [36] 童金南, 楚道亮, 梁蕾, 等. 中国三叠纪综合地层和时间框架[J]. 中国科学(地球科学), 2019, 49(1): 194-226.
TONG Jinnan, CHU Daoliang, LIANG Lei, et al. Triassic integrative stratigraphy and timescale of China[J]. Scientia sinica (terrae), 2019, 49(1): 194-226.
- [37] WARREN J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations [J]. Earth-science reviews, 2000, 52(1/3): 1-81.
- [38] KEITH M L, WEBER J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils[J]. Geochimica et cosmochimica acta, 1964, 28(10/11): 1787-1816.
- [39] ZHAO Yanyan, ZHENG Yongfei, CHEN Fukun. Trace element and strontium isotope constraints on sedimentary environment of Ediacaran carbonates in Southern Anhui, South China[J]. Chemical geology, 2009, 265(3/4): 345-362.
- [40] ALFIMOVA N A, KUZNETSOV A B, V. KLIMOVA E, et al. Archean-Proterozoic unconformity on the Fennoscandian shield: geochemistry and Sr, C and O isotope composition of Paleoproterozoic carbonate-rich regolith from Segozero Lake (Russian Karelia) [J]. Precambrian research, 2022, 368: 106459.
- [41] AZMY K, VEIZER J, MISI A, et al. Dolomitization and isotope stratigraphy of the Vazante Formation, São Francisco Basin, Brazil[J]. Precambrian research, 2001, 112(3/4): 303-329.
- [42] 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.
- [43] JOHANNESSON K H, PALMORE C D, FACKRELL J, et al. Rare earth element behavior during groundwater-seawater mixing along the Kona Coast of Hawaii [J]. Geochimica et cosmochimica acta, 2017, 198: 229-258.
- [44] WEBB G E, NOTHDURFT L D, KAMBER B S, et al. Rare earth element geochemistry of scleractinian coral skeleton during meteoric diagenesis: a sequence through neomorphism of aragonite to calcite[J]. Sedimentology, 2009, 56(5): 1433-1463.
- [45] 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 海相碳酸盐岩储集层发育主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 545-554.
SHEN Anjiang, ZHAO Wenzhi, HU Anping, et al. Major factors controlling the development of marine carbonate reservoirs [J]. Petroleum exploration and development, 2015, 42(5): 545-554.
- [46] CORYELL C D, CHASE J W, WINCHESTER J W. A procedure for geochemical interpretation of terrestrial rare-earth abundance patterns [J]. Journal of geophysical research, 1963, 68(2): 559-566.
- [47] ZHAO Yanyan, WEI Wei, LI Sanzhong, et al. Rare earth element geochemistry of carbonates as a proxy for deep-time environmental reconstruction [J]. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 2021, 574: 110443.
- [48] BAU M, DULSKI P. Distribution of Yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman iron-formations, Transvaal Supergroup, South Africa [J]. Precambrian research, 1996, 79(1/2): 37-55.
- [49] NOZAKI Y, LERCHE D, ALIBO D S, et al. Dissolved indium and rare earth elements in three Japanese rivers and Tokyo Bay: evidence for anthropogenic Gd and In [J]. Geochimica et cosmochimica acta, 2000, 64(23): 3975-3982.
- [50] ROBBINS L J, LALONDE S V, PLANAVSKY N J, et al. Trace elements at the intersection of marine biological and geochemical evolution[J]. Earth-science reviews, 2016, 163: 323-348.
- [51] LAN Zhongwu, WU Shitou, WANG Fangyue, et al. A ca. 290 Ma hydrothermal calcite in Cambrian dolostone [J]. Marine and petroleum geology, 2023, 147: 106011.
- [52] 赵彦彦, 李三忠, 李达, 等. 碳酸盐(岩)的稀土元素特征及其古环境指示意义[J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(1): 141-167
ZHAO Yanyan, LI Sanzhong, LI Da, et al. Rare earth element geochemistry of carbonate and its paleoenvironmental implications[J]. Geotectonica et metallogenia, 2019, 43(1): 141-167.
- [53] BONTIGNALI T R R, VASCONCELOS C R, WARTH-MANN R J, et al. Dolomite formation within microbial mats in the coastal sabkha of Abu Dhabi (United Arab Emirates) [J]. Sedimentology, 2010, 57(3): 824-844.
- [54] MAHBOUBI A, NOWROUZI Z, AL-AASM I S, et al. Dolomitization of the Silurian Niur Formation, Tabas block, east central Iran: fluid flow and dolomite evolution[J]. Marine and petroleum geology, 2016, 77: 791-805.
- [55] 韩征, 余素玉. 滇西宁蒗—丽江地区泥盆系白云岩的成因[J]. 沉积学报, 1990(2): 51-58.
HAN Zheng, YU Suyu. The origin of Devonian dolomitic rocks from Ninglang-Lijiang region, West Yunnan [J]. Acta sedimentologica sinica, 1990(2): 51-58.
- [56] CHOQUETTE P W, HIATT E E. Shallow-burial dolomite cement: a major component of many ancient sucrosic dolomites [J]. Sedimentology, 2008, 55(2): 423-460.
- [57] SYLVESTRE G, LAURE N T E, DJIBRIL K N G, et al. A mixed seawater and hydrothermal origin of superior-type banded iron formation (BIF)-hosted Kouambo iron deposit, Palaeoproterozoic Nyong series, Southwestern Cameroon: constraints from petrography and geochemistry [J]. Ore geology reviews, 2017, 80: 860-875.
- [58] RADKE B M, MATHIS R L. On the formation and occurrence of saddle dolomite[J]. Journal of sedimentary research, 1980, 50(4): 1149-1168.

- [59] MA Pengjie, LIN Chengyan, JAHREN J, et al. Cyclic zoning in authigenic saddle dolomite–ankerite: indications of a complex interplay between fault–rupturing and diagenetic alteration[J]. *Chemical geology*, 2021, 559: 119831.
- [60] LUCZAJ J A, HARRISON W B III, 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.
- [61] OHMOTO H. Isotopes of sulfur and carbon[J]. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 1979: 509–567.
- [62] 黄思静, QING Hairuo, 胡作维, 等. 封闭系统中的白云石化作用及其石油地质学和矿床学意义: 以四川盆地东北部三叠系飞仙关组碳酸盐岩为例[J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2955–2962.
- HUANG Sijing, QING Hairuo, HU Zuwei, et al. Closed-system dolomitization and the significance for petroleum and economic geology: an example from Feixianguan carbonates, Triassic, NE Sichuan Basin of China[J]. *Acta petrologica sinica*, 2007, 23(11): 2955–2962.

编辑: 韦东晓 张润合

Genetic mechanism and its oil and gas geological significance of dolomites of the Long'eni–Angdarco–Dazuoma palaeo–reservoir in southern Qiangtang Basin, China

ZHANG Jian^{1,2,3}, WANG Jian^{3,4}, ZHANG Jianyong^{5,6}, XIONG Shaoyun^{5,6}, ZHENG Bo^{3,4}, SHEN Lijun^{3,4}

1. Chinese Academy of Geological Sciences; 2. China University of Geosciences(Beijing);

3. Southwest Petroleum University; 4. National Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation;

5. State Energy Key Laboratory for Carbonate Oil and Gas; 6. Key Laboratory of Carbonate Reservoir, CNPC;

Abstract: The oil-bearing dolomites exposed in the Long'eni–Angdarco–Dazuoma region have been proven to be a favorable carbonate reservoir in the Qiangtang Basin. Its genetic mechanism is significant for oil and gas exploration in the Qiangtang Basin. In this study, comprehensive analysis of rock thin section identification, carbon and oxygen isotopes, trace and rare earth elements and strontium isotopes are conducted to investigate the genetic mechanisms of the palaeo–reservoir dolomites and the formation and evolution process of the dolomites reservoirs. The main findings are as follows: (1) Dolomite types are subdivided into micritic–very fine crystalline residual structure dolomite, fine crystalline subhedral–anhedral dolomite, fine crystalline euhedral dolomite, medium–coarse crystalline subhedral dolomite, cloudy core and clear rim structure crystalline dolomite and saddle dolomite with late filling holes. (2) The petrological and diagenetic fluid geochemical studies indicate that the micritic–very fine crystalline residual structure dolomite is formed by syngenetic microbial dolomitization. The fine crystalline subhedral–anhedral dolomite and medium–coarse crystalline subhedral dolomite are formed via reflux dolomitization, which occurred during the shallow burial stage. The fine crystalline euhedral dolomite is formed by the deep burial dolomitization. The cloudy core and clear rim structure crystalline dolomite is formed by the near–surface mixing–zone dolomitization during the uplift stage. The saddle dolomite is formed by the hydrothermal dolomitization. (3) The genetic mechanism of dolomites in the palaeo–reservoir reveals the evolution process of burial conditions and reservoir space of dolomites. Secondary pores are formed by dolomitization, meteoric freshwater leaching and hydrothermal dissolution, forming a good dolomite scale reservoir, which can be used as one of the target reservoirs for oil and gas exploration. These understandings provide new theoretical references for the study of hydrocarbon accumulation evolution and the prediction of high–quality carbonate reservoirs in the Qiangtang Basin.

Key words: geochemical characteristics; dolomite genesis; reservoir evolution; palaeo–reservoir; southern Qiangtang

ZHANG Jian, First author: PhD Candidate, mainly engaged in reservoir geology of carbonate rocks and analysis of hydrocarbon-bearing basins. Add: No. 8 Xindu Rd., Xindu District, Chengdu, Sichuan 610500, China. E-mail: zhang199j@163.com

WANG Jian, Corresponding author: PhD, Professor, mainly engaged in teaching and scientific research on tectonic sedimentology and analysis of hydrocarbon-bearing basins. Add: No. 8 Xindu Rd., Xindu District, Chengdu, Sichuan 610500, China. E-mail: w1962jian@163.com