

羌塘盆地南坳陷中侏罗统布曲组白云岩储层成因流体同位素地球化学示踪

万友利^{1,2}, 王 剑^{1,3}, 付修根^{1,2}, 王 东^{1,2}

(1. 自然资源部 沉积盆地与油气资源重点实验室, 四川 成都 610081; 2. 中国地质调查局 成都地质调查中心 沉积地质研究室, 四川 成都 610081; 3. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500)

摘要:在岩石学分类基础上,通过获取不同世代碳酸盐矿物的C、O和Sr同位素,对白云岩成因流体进行示踪,结果表明:①研究区布曲组白云岩经历了多期白云石化流体的叠加改造,保留先驱灰岩原始组构的白云岩和晶粒白云岩的成因流体为同期海水,C、O和Sr同位素组成具有对先驱灰岩具有一定的继承性;②随着埋藏深度的增加,白云石晶体结构逐渐变化, $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)值相应逐步负偏:微粉晶白云岩(-3.81‰)—细晶、自形白云岩(-4.34‰)—细晶、半自形白云岩(-6.10‰)—中—粗晶、它形白云岩(-7.36‰);③鞍形白云石的成因流体为大气淡水深循环至深部地层,再流经下伏地层碎屑岩地层进入布曲组中,78~64 Ma的构造热时间提供热源;④细—中晶、自形白云石胶结物、白云岩晶间孔胶结的方解石,形成于浅埋藏末期,成因流体为埋藏的同期海水,裂缝中充填方解石脉发育在鞍形白云石之后,其成因流体主要为大气淡水,且与青藏高原隆升有关。多期次白云石化流体的叠加改造及大气淡水淋滤、溶蚀,影响布曲组白云岩储层的形成与分布,并制约着白云岩储层的质量。

关键词:同位素地球化学;成因流体;白云岩储层;布曲组;羌塘盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Geochemical tracing of isotopic fluid of dolomite reservoir in the Middle Jurassic Buqu Formation in southern depression of Qiangtang Basin

Wan Youli^{1,2}, Wang Jian^{1,3}, Fu Xiugen^{1,2}, Wang Dong^{1,2}

(1. Key Laboratory for Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan 610081, China;
2. Sedimentary Geology Research, Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China;
3. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: This paper presents study on the properties and evolution of genetic fluids in the dolomite reservoir of the Buqu Formation in the southern depression of Qiangtang Basin. Petrological classification is performed on the dolomite and genetic fluids tracing is carried out through isotopic analysis of carbon, oxygen, and strontium (C, O, Sr) in carbonate minerals of various ages. The results show that: (1) the Buqu dolomite in the study area experienced multiple-stage superimposed modification by dolomitization fluids, the genetic fluids of dolomite and crystalline-grained dolomite with original structure of precursor limestone are contemporaneous seawater. The isotopic (C, O, Sr) composition has a certain inheritance to the precursor limestone. (2) With the increase of burial depth, the crystalline structure of dolomite changed gradually. The oxygen-isotope ($\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$) gradually became more negative: from micro-fine-crystalline dolomite (-3.81‰), to fine-crystalline and automorphic dolomite (-4.34‰), to fine-crystalline and hypautomorphic dolomite (-6.10‰), and to medium-to-coarse-crystalline and xenomorphic dolomite (-7.36‰). (3) Genetic fluids of saddle-shaped dolomite is meteoric water which flows through the underlying clastic formations into the Buqu Formation. The primary heat source was related to tectonic hydrothermal events and lasts 78–64 Ma. (4) Fine-to-medium-crystalline and automorphic dolomite cements, intercrystalline dolomite pore-filled calcites may have been developed at the end of

收稿日期:2019-03-13;修订日期:2019-11-09。

第一作者简介:万友利(1984—),男,博士,储层地质与储层地球化学。E-mail:wanyouli@cdut.edu.cn。

通讯作者简介:王剑(1962—),男,博士,研究员,沉积能源地质与大地构造学。E-mail:wj1962jian@163.com。

基金项目:中国地质调查局项目(DD20160159;DD20190116)。

shallow burial stage. The genetic fluid is contemporaneous seawater. The bright calcite veins are developed after the saddle-shaped dolomite, and its genetic fluid may be meteoric water related with the uplifting of Qinghai-Tibet Plateau. The superposition of multi-stage dolomitization fluids, meteoric water leaching and dissolution affected the formation and distribution of dolomite reservoirs in the Buqu Formation, and further controlled the quality of dolomite reservoirs herein.

Key words: isotopic geochemistry, genetic fluid, dolomite reservoir, Buqu Formation, Qiangtang Basin

“白云石(岩)问题”一直是沉积学最具争议的焦点问题之一。近年来,有人在实验室条件下合成了无序白云石^[1],以及对“生物白云岩”的深入研究,提出微生物能够克服动力学障碍,促进白云石沉淀^[2],但对古代地层中的大套白云岩而言,沉积学家和石油勘探家仍认为是白云石化作用的产物^[3-4]。白云石化作用研究的核心内容是白云石化流体及水-岩作用过程,并据此建立相应的白云石化模式:准同生作用^[5]、埋藏作用^[6]、盆地深层热卤水^[7]、以及岩浆热液^[8]或地幔热流体作用等,形成多种观点并存的局面。同时,碳酸盐岩在埋藏过程中的成岩环境及流体性质,直接影响碳酸盐岩储层中矿物的溶蚀和沉淀过程,进而控制着储层的孔、洞形成和保存程度,是制约白云岩储层质量的关键因素^[4,9-10]。

羌塘盆地位处青藏高原腹地,是中国勘探程度最低的中生代海相沉积盆地。经过近20余年的勘探表明,布曲组白云岩储层是羌塘盆地中生代沉积构造层整体致密背景下的优质储层^[11-12]。前人对这套储层分别从沉积环境^[13-14]、白云岩成因^[15-23]和储层特征^[15-16,24]等方面进行了大量研究,他们关于这套白云岩储层的成因的认识不仅存在争议,而且难以确保获取的研究区白云岩地球化学信息的准确和全面。如前期的研究均采用全岩样品进行,所获取的白云岩地球化学信息无法准确反映其白云石化流体性质,同时他们也仅是简单套用混合水白云石化模式,并未结合羌塘盆地实际^[15-21],或者研究仅限于晶粒白云岩,未能全面涵盖所有白云岩类型^[22],即使新近提出的、可能更符合实际的观点“布曲组白云岩是多期次白云石化叠加的结果”^[23,25-26],也需要更多的研究资料证实。鉴于此,本次研究在前期详细岩石学分类基础上,通过获取不同类型和不同世代碳酸盐矿物的C、O和Sr同位素,结合流体包裹体测温资料,恢复南羌塘拗陷布曲组成岩环境、反演白云岩成因流体性质及演化过程,以期为羌塘盆地碳酸盐岩储层勘探提供地质依据。

1 区域地质背景

羌塘盆地位于特提斯域东段,是在前奥陶系结晶

基底上发育的中生代海相沉积盆地^[13,27-28],夹持于北侧可可西里-金沙江缝合带和南侧班公湖-怒江缝合带之间,自北向南分为羌塘北缘褶皱冲断带、北坳陷、中央隆起带和南坳陷4个一级构造单元,盆地主体呈“两坳夹一隆”的构造格局(图1)。南坳陷的构造演化与其南侧的中特提斯洋的演化息息相关。在晚三叠世末期,盆地南侧的拉萨地块向北挤压之后,地球动力学翻转,造成班公湖-怒江洋盆(中特提斯洋)的又一次扩张,标志着羌塘中生代海相沉积盆地的开启^[13],经历早侏罗世曲色组的裂陷期,到中侏罗世色哇组和布曲组沉积期,盆地进入持续稳定的沉降阶段——拗陷期^[28]。受盆地南侧班公湖-怒江洋盆(中特提斯洋)进一步扩展影响,在盆地拗陷期,发育了布曲组巨厚层碳酸盐岩。南坳陷布曲组白云岩在剖面上具有南北分带、东西分块的特征,即在南坳陷自西向东分为隆鄂尼区块、昂达而错区块和达卓马-鄂斯玛区块^[24]。

2 岩石学特征

前人依据地质剖面资料,认为研究区白云岩储层在垂向上呈大套白云岩出露,但剖面风化严重,掩盖很多可靠的地质信息。依据2014年QZ12井的岩心资料:该井钻遇布曲组地层倾角较大(可达60°),将在剖面上风化严重的岩层厚度放大后,井深213.56 m至地表发育白云岩储层,此白云岩段不是大套白云岩,而是表现出多个受高频相对海平面变化的岩性旋回叠置(图2)。共识别出81个灰岩-白云岩(厘)米级旋回,每个旋回底部发育薄层状泥晶灰岩(图2a)、泥晶砂屑灰岩或亮晶砂屑灰岩,向上变为灰质云岩-白云岩,在岩心上,白云岩层段可分为纹层状白云岩、细晶白云岩、中晶白云岩及白云岩角砾,并且白云岩段普遍含油。QZ11井底部576.30~587.30 m井段发育灰黑色针孔状中晶白云岩,裂隙发育,充填白色鞍形白云石脉或白色方解石脉,587.30~592.25 m井段发育灰黑色含藻白云岩,局部重结晶作用强烈,592.25~600.00 m井段发育灰黑色针孔状中晶白云岩,裂隙发育,充填鞍形白云石脉。

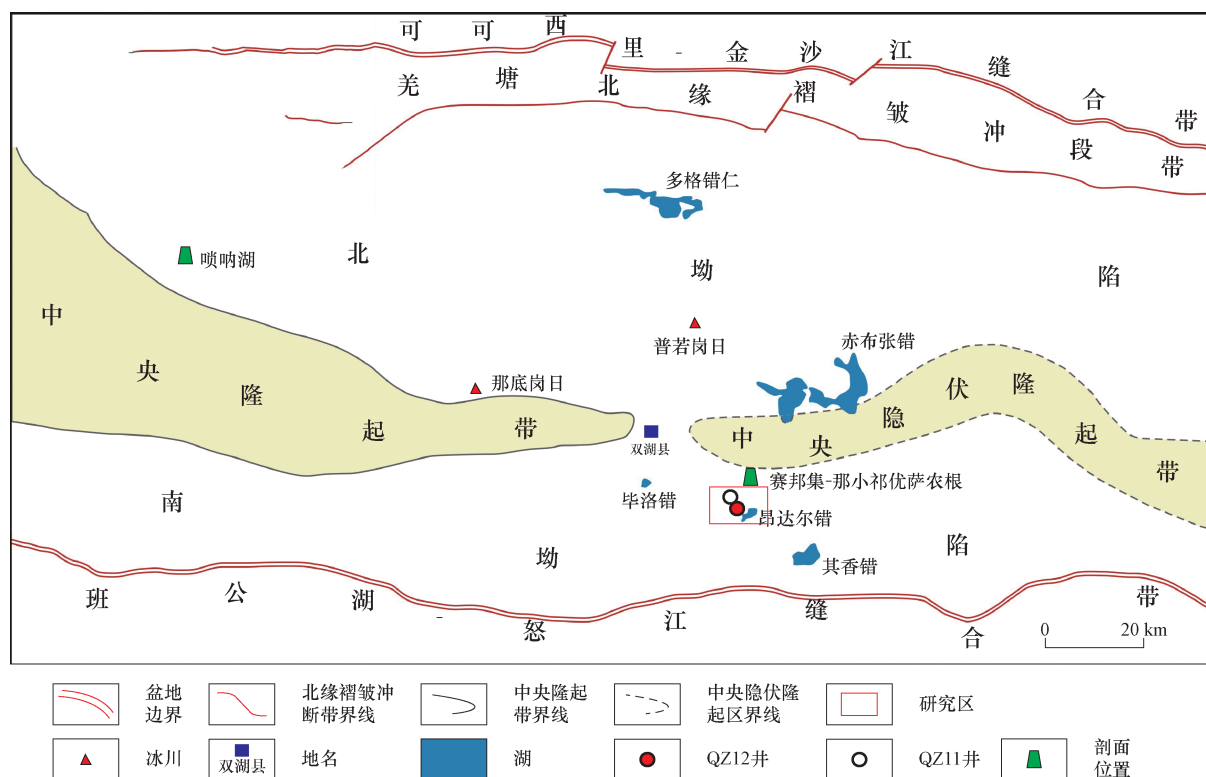


图1 羌塘盆地构造单元划分与研究区位置

Fig. 1 Division of tectonic units in the Qiangtang Basin and the location of the study area

在前期研究工作中^[23-26],依据研究区白云岩对先驱灰岩原始组构的保留程度,分为保留先驱灰岩原始组构的白云岩和晶粒白云岩,保留先驱灰岩原始组构的白云岩包括纹层状白云岩(图2b)、微-粉晶白云岩和(残余)颗粒白云岩(图2f),微粉晶白云岩主要由微晶-粉晶级白云石组成,晶体细小、自形程度差,多为半自形-它形晶体,在岩心上多呈纹层状产出,局部可见似鸟眼构造。(残余)颗粒白云岩的最大特点是保留或具残余先驱灰岩的原始组构,在岩心上,这类白云岩的颗粒以藻砂屑为主,偶见残余藻砂屑结构。晶粒白云岩依据晶体边界将其分为自形晶、半自形晶和它形晶^[29-30];按照晶体大小分为细晶和中-粗晶,结合研究区实际情况,将晶粒白云岩分为细晶、自形白云岩,细晶、半自形白云岩和中-粗晶、它形白云岩。同时,由于白云石可以以充填物的形式发育在裂缝或孔洞中,对白云岩储层成因具有重要指示意义,如鞍形白云石往往被认为与热液有关^[8],因此将这类白云石单独分为白云石充填物。

细晶、自形白云岩在研究区分布广泛,剖面上见到的“砂糖状含油白云岩”多以该类白云岩为主(图2c),在岩心上以浅灰黄色-浅灰色为主,呈中厚层状产出,显微镜下以细晶(0.05~0.25 mm)为主,少量粉晶,晶间孔隙发育,局部被亮晶方解石充填(图2g)。细晶、

半自形白云岩在研究区发育程度仅次于细晶、自形白云岩的规模,剖面上见到的“砂糖状含油白云岩”包括部分该类白云岩,岩心上以深灰色为主,多与细晶、自形白云岩呈互层状产出。镜下以细晶为主,晶体自形程度比细晶、自形白云岩有所降低,以半自形为主,少量半自形-它形,晶体间以线接触为主,局部可见镶嵌状接触,晶间孔隙较细晶、自形白云岩大幅度降低,部分孔隙被方解石充填。研究区中-粗晶、它形白云岩包括两种:一种在岩心上呈斑点状产出,镜下为含灰质白云岩或者灰质白云岩,属于过渡性岩类(图2i),发现白云石部位多为异化颗粒间的灰泥或胶结物,少量为生物骨骼;另一种以灰色-深灰色、块状或中厚层状产出的纯白云石,镜下以中-粗晶为主(0.25~2 mm),局部可见细晶或泥-粉晶重结晶形态,晶间孔隙匮乏,正交偏光下见波状消光(图2h)。

白云石胶结物包括和鞍形白云石充填,细-中晶、自形白云石充填物发育在白云岩晶间孔隙内壁上,以细晶为主,少量粉晶或中晶,向孔方向晶体自形程度变好,具有平直的晶面边界(图2j);鞍形白云石充填物在QZ11井587.30~600.00 m井段最为发育,该井段白云岩岩心为灰黄色针孔状白云岩(图2d),镜下见白云石充填物晶粒粗大,单偏光下晶面污浊,正交偏光下具明显的波状消光特征,晶体边界弯曲呈似镰刀状(图2k)。

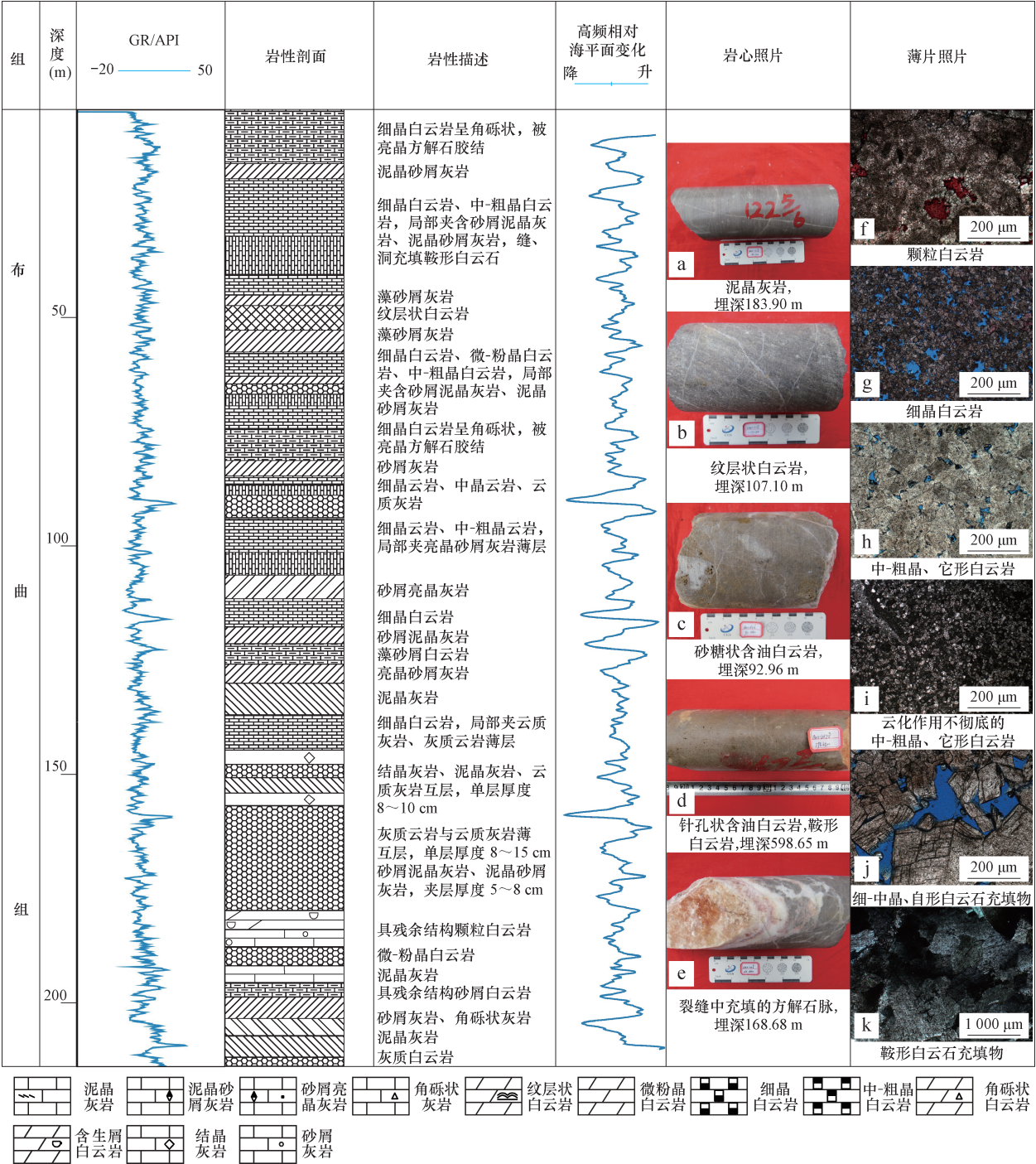


图 2 羌塘盆地南坳陷 QZ12 井布曲组白云岩储层纵向上岩性结构及照片特征

Fig. 2 The characteristics of the vertical lithologic structure of the Buqu Formation in Well QZ12 in southern depression of Qiangtang Basin

3 测试方法与测试结果

本次研究是在前期详细岩石学分类基础上完成, 在进行岩石学分类研究时, 用牙钻对不同 类型白云石样品进行取样(精度 0.05 ~0.1 mm), 保留副样。选择白云石类型单一、受成岩后生作用影响小、纯度高的白云岩及缝、洞内充填的白云石和方解石等矿物, 剔除白

云石化后被其他矿物充填或溶蚀蚀变的样品。样品经粉碎处理后, 用玛瑙碾钵磨细至 200 目备用。

对 QZ11 井和 QZ12 井不同类型白云岩及充填物进行系统样, 共采集样品 35 件, 其中微粉晶白云岩样品 3 件, 细晶、自形白云岩样品 5 件, 细晶、半自形白云岩样品 5 件, 中 - 粗晶、它形白云岩样品 6 件, 细 - 中晶、自形白云石充填物 1 件, 鞍形白云石充填物 4 件, 裂缝内充填方解石脉 7 件, 分离出白云岩晶间孔内充

填的方解石 1 件,为方便对比分析,采集未受明显成岩蚀变的泥晶灰岩样品 2 件、亮晶砂屑灰岩 1 件。

灰岩及各类白云石样品(共 27 件)的碳氧同位素测试,在成都理工大学“油气藏地质及开发工程国家重点实验室”完成,仪器为 MAT253 同位素质谱分析仪;方解石充填物样品(共 8 件)的碳氧同位素分析,在西南石油大学地球科学与技术学院实验测试中心完成,仪器为 MAT252 同位素质谱分析仪。碳氧同位素测试时,均采用纯磷酸法制备 CO₂,即对已磨细至 200 目的样品用无水正磷酸溶解,在 25 ℃ 真空条件下反应 24 h,以消除可能存在的方解石影响,随后收集纯化

的 CO₂ 气体,用于质谱仪分析,结果采用 PDB 标准,以 δ 值表示,检测依据 DZ/T0184. 17—1997,分析误差 ±0.0005 %。

Sr 同位素分析在成都理工大学“油气藏地质及开发工程国家重点实验室”完成,仪器为热电离固体同位素质谱(TIMS),化学流程按国际通用规范,溶样后经阳离子交换柱分离纯化,实验条件为温度 22 ℃,湿度 50 %,检测依据采用美国国家标准局标准样品 NBS987,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值的分析误差 ±0.002 %。

羌塘盆地南坳陷布曲组灰岩、白云岩及各类缝、洞充填物的 C、O 和 Sr 同位素测试结果见表 1。

表 1 羌塘盆地南坳陷 QZ12 井布曲组白云岩及充填物 C、O 和 Sr 同位素值

Table 1 The C、O and Sr isotopic values of each type of the Buqu dolomites from Well QZ12 in southern depression of Qiangtang Basin

样品编号	深度/m	岩石类型	δ ¹³ C (PDB)/‰	δ ¹⁸ O (PDB)/‰	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr
16D-13	75.22	泥晶灰岩	1.19	-8.25	0.707 765
16D-20	130.83	泥晶灰岩	1.96	-8.62	0.707 763
16D-21	131.46	亮晶砂屑灰岩	2.57	-7.47	0.707 850
16D-07	58.24	微粉晶白云岩	3.74	-4.22	0.707 747
16D-14	96.21	纹层状白云岩	3.42	-3.84	0.708 176
16D-25	198.13	微粉晶白云岩	4.23	-3.37	0.707 654
16D-06	57.31	细晶、自形白云石	4.11	-4.56	0.707 525
16D-15	100.63	细晶、自形白云石	3.64	-4.33	0.707 667
16D-17	102.02	细晶、自形白云石	3.18	-4.23	0.707 572
16D-22	143.12	细晶、自形白云石	3.33	-4.25	0.708 037
16D-23	151.71	细晶、自形白云石	3.83	-4.31	0.707 686
16D-02	26.57	细晶、半自形白云石	4.42	-5.87	0.707 432
16D-03	30.24	细晶、半自形白云石	4.18	-6.26	0.707 609
16D-05	43.43	细晶、半自形白云石	3.95	-6.23	0.707 990
16D-16	101.12	细晶、半自形白云石	3.28	-5.56	0.707 780
16D-24	190.37	细晶、半自形白云石	2.72	-6.57	0.707 593
16D-01	24.29	中-粗晶、它形白云石	3.24	-7.22	0.707 303
16D-04	43.43	中-粗晶、它形白云石	4.05	-7.65	0.707 884
16D-10	67.73	中-粗晶、它形白云石	3.92	-8.22	0.707 752
16D-12	72.73	中-粗晶、它形白云石	3.85	-6.56	0.707 234
16D-18	107.14	中-粗晶、它形白云石	4.14	-8.16	0.707 593
16D-27	581.62	中-粗晶、它形白云石	3.68	-6.37	0.707 865
16D-19	122.84	细-中晶、自形白云石胶结物	3.02	-5.31	0.708 147
16D-08	60.65	鞍形白云石胶结物	-0.09	-10.41	0.708 518
16D-09	60.64	鞍形白云石胶结物	3.38	-9.58	0.708 876
16D-11	69.33	鞍形白云石胶结物	1.27	-9.25	0.708 562
16D-26	580.95	鞍形白云石胶结物	1.86	-8.56	0.708 180
14QZ12-026	105.02	白云石晶间孔中充填的方解石	3.73	-5.38	0.708 128
14QZ12-001-1	232.16	裂缝第二期充填肉红色方解石脉	-1.15	-13.04	
14QX12-001-2	232.16	裂缝充填第三期白色粗-巨晶方解石	-0.85	-11.97	
14QZ12-005	219.76	裂缝充填第二期肉红色方解石脉	-1.35	-11.33	
14QZ12-007	219.81	裂缝充填第一期白色方解石脉	0.57	-10.62	
14QZ12-013	195.75	裂缝充填第三期白色粗-巨晶方解石	1.89	-10.45	
14QZ12-029	75.32	裂缝充填第一期白色方解石脉	-1.18	-9.42	
14QZ12-030	70.96	裂缝充填第一期白色方解石脉	1.64	-10.75	

4 同位素地球化学特征

自寒武系以来,沉积岩中C、O和Sr同位素随地质年代呈明显变化^[31]。其中,C、O同位素是进行古海洋环境^[32-33]、古海平面变化^[34]以及物源分析^[35]等研究工作的常用手段,也可用来研究成岩强度^[36],以及进行成岩流体示踪^[37-38]。由于Sr在海水中残留时间远长于海水的混合时间,因而任意时代全球范围内的海相Sr在同位素组成上是均一的^[39],并且Sr同位素在地质历史时期中不像C和O同位素那样易因生物、盐度、温度和压力的变化而分馏或同位素交换,可作为碳酸盐岩成岩流体示踪有效手段^[40]。羌塘盆地布曲组沉积期,随着盆地南侧的班公湖-怒江洋盆进一步扩张,盆地内部发生大规模海侵,风化作用减弱,陆壳铝硅质碎屑输入降低,同时受班公湖-怒江洋盆中幔源物质影响,造成⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值下降(表1),并可与全球对比^[31]。

4.1 碳、氧同位素

4.1.1 准同生阶段同位素特征

研究区布曲组白云岩段中伴生的灰岩样品(表1),泥晶灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)值变化范围为1.19‰~1.96‰,平均值为1.58‰,亮晶砂屑灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)值为2.57‰,泥晶灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)值与同期海相方解石(0~2‰)相当^[31],而亮晶砂屑灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)值高于同期海相方解石。按通常理解,生物活动影响的碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值往往具有负偏特征,如大洋缺氧事件(T-AOE)碳同位素曲线“CIE”^[41-42]。对研究区而言,亮晶砂屑灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)值高于同期海相方解石,分析原因可能在于:亮晶砂屑灰岩的砂屑为藻屑,藻类在繁育时以消耗水体中¹²C为主,使得水体中¹³C相对富集,进而造成在此环境中沉积的无机碳酸盐矿物¹³C正偏;也可能代表亮晶砂屑灰岩形成于具局限环境的蒸发条件^[43]。灰岩样品的 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)值变化范围为-8.62‰~-7.47‰,平均值为-8.11‰,虽然低于中侏罗统巴通阶海相方解石的氧同位素组成^[31],但与前人报道的羌塘盆地中生代布曲组泥晶灰岩值相当,可能代表着羌塘盆地O同位素演化的特征^[43-44]。假设中侏罗统巴通阶海水中直接沉淀的方解石 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)值分布范围为-8.6‰~-7.47‰,由于从相同流体中形成的方解石和白云石的O同位素之间存在着1.5‰~3.5‰的分馏^[45],取其平均值2.5‰,得出同期正常海水中形成的白云石O同位素范围为-6.12‰~-4.97‰,以此为参考,可进行研究区不同类型白云岩

的成因流体性质的探讨。

准同生阶段发育的微-粉晶白云岩(表1),其 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)值变化范围为-4.22‰~-3.37‰,平均值为-3.81‰; $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)值变化范围3.42‰~4.23‰,平均值3.80‰。一般认为蒸发条件下,随着水体盐度的升高,其沉积的碳酸盐岩C和O同位素值往往出现正偏^[43]。对比研究区同期灰岩,准同生阶段白云岩的C-O同位素均呈明显正偏特征,但又未在岩心上见到伴生的蒸发盐类,说明该类白云岩可能继承了碳酸盐泥的C同位素组成,同时受到蒸发海水的改造。结合区域沉积背景,布曲组下伏地层莎巧木组沿鄂雅错北东、毕洛错东、昂达尔错和其香错西一线展布,大致平行于肖茶卡-毕洛错裂陷槽^[28],为浅海-陆棚环境发育的滩坝砂体,形成水下障壁,布曲组沉积时继承了这一古地貌特征,发育了台缘礁滩环境碳酸盐岩沉积^[23],布曲组白云岩段往往发育在高频相对海平面下降过程,随着海平面下降,强烈的蒸发作用使得海水咸化,表层的海水在浓度差或盐度差的驱动下形成对流,扩散到碳酸盐泥中,交代形成微-粉晶白云岩。

4.1.2 浅埋藏阶段同位素特征

研究区浅埋藏阶段形成的白云岩包括细晶、自形白云石和细晶、半自形白云石(表1),细晶、自形白云岩样品的 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)值变化范围为-4.56‰~-4.23‰,平均值为-4.34‰, $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)值变化范围为3.18‰~4.11‰,平均值为3.62‰;细晶、半自形白云岩样品的 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)值变化范围为-6.57‰~-5.56‰,平均值为-6.10‰, $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)值变化范围为2.72‰~4.42‰,平均值为3.71‰。这两类白云岩的C同位素组成与准同生阶段微粉晶白云岩相当(图3),但要高于同期灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)值,说明该阶段发育的白云岩碳同位素组成可能继承了先驱灰岩的C同位素值,同时受到蒸发海水的影响,也有可能为高频相对海平面下降阶段,由于台缘滩向陆一侧的海水受到障壁阻碍,与广海沟通受限,同时海洋生物(如藻类)大量发育,使得¹²C大量向有机碳库迁移,进而造成该时期沉积的碳酸盐中¹³C富集,在经历浅埋藏阶段白云石作用时,继承了先驱灰岩的C同位素组成。O同位素方面,虽然这两类白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)‰值均高于同期灰岩,结合C同位素组成,可以指示白云石化流体为同期蒸发海水,但相较于微粉晶白云岩,这两类白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)值呈明显负偏,且细晶、半自形白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)值也负偏于细晶、自形白云岩(图3),说明随着埋藏深度的增加,地层温度逐渐升

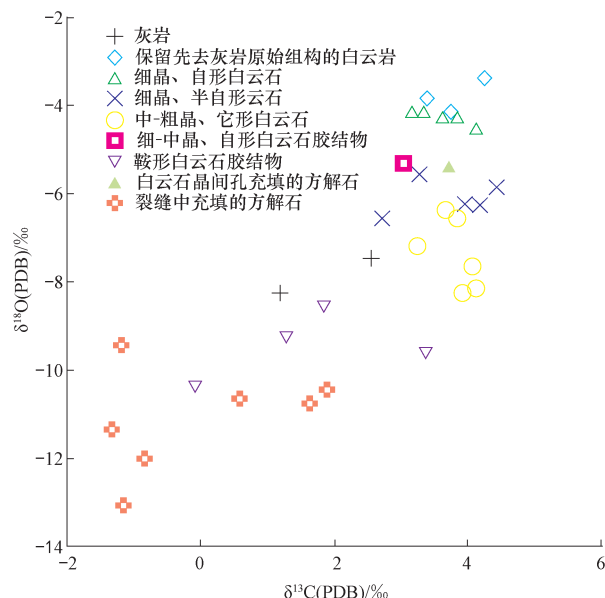


图3 羌塘盆地南坳陷布曲组不同类型白云岩 C-O 同位素交汇图

Fig. 3 The cross-plot of O and C isotope values for each type of the Buqu dolomites in southern depression of Qiangtang Basin

高,造成 O 同位素分馏,使得浅埋藏阶段白云岩 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值低于准同生阶段。细晶、半自形白云岩 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值低于细晶、自形白云岩,说明细晶、半自形白云岩发育时间要晚于细晶、自形白云岩,可能发育在浅埋藏阶段末期。

在高频相对海平面下降初期,同期蒸发海水(正常海水或者中等盐度海水)在浓度差或盐度差的驱动下,进入到相邻碳酸盐沉积物中,一起进入埋藏状态。随着埋深的增加,地层温度升高,克服白云石沉淀热力学屏障,交代灰岩形成白云岩,在浅埋藏阶段初期,遵循等摩尔交代,同时,理论计算表明 1 mol 的白云岩交代 1 mol 的灰岩,可增加 13% 的孔隙度,即等摩尔交代是固相体积较少的过程,此时能够为白云石生长提供足够的空间,因此发育细晶、自形白云岩。至浅埋藏阶段末期,地层流体中富余的 Mg^{2+} ,和地层流体中存在的 CO_3^{2-} 和 Ca^{2+} 结合,形成过量的白云石沉淀,即等体积交代作用,但此时空间受限,白云石不能够再自由生长,表现出对空间的竞争性争夺,从而形成细晶、半自形白云岩。在此过程中,由于地层温度逐渐升高,O 同位素分馏增强,进而造成细晶、半自形白云岩的 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值低于细晶、自形白云岩。部分细晶、半自形白云岩 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值低于细晶、自形白云岩,可能与有浅埋藏阶段末期,有机质热演化时排出的生物源 CO_2 有关。

4.1.3 中-深埋藏阶段同位素特征

中-深埋藏阶段的中-粗晶、它形白云岩(表1),

其 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值变化范围为 $-8.22\text{‰} \sim -6.37\text{‰}$,平均值为 -7.36‰ ; $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值变化范围 $3.24\text{‰} \sim 4.14\text{‰}$,平均值为 3.81‰ 。布曲组沉积物在进入中深埋藏阶段,缝合线开始出现,其深度一般在 600 m 以下,该阶段形成的白云岩以中-粗晶、它形白云石为主,并且形成的温度与围岩温度相当,没有明显的热异常。在岩心上,该阶段发育的白云岩有两种产出方式:一种是不彻底的或者是选择性的白云石化产物,属于灰岩和白云岩之间的过渡类型;另一种则是以灰色或深灰色、中厚层状(块状)产出的纯白云岩,岩心上裂缝及溶蚀孔洞发育程度高,并伴随有鞍形白云石的充填,说明该类白云岩可能在埋藏过程中受到热液流体的改造。

中-粗晶、它形白云岩主要由非平面-曲面、它形白云石组成,与前面的晶粒白云岩在结构上差别明显,前人研究认为较高的形成温度^[29-30]、高度过饱和的白云石化流体^[29]、以及晶体为争夺生长空间而产生的竞争性生长^[46]是晶面弯曲的因素,对于羌塘盆地南坳陷布曲组中-粗晶、它形白云岩而言,相对较粗的晶粒、波状消光以及伴生有压溶缝合线的现象,说明其形成于温度不断升高的中-深埋藏阶段^[47]。该类白云岩的 O 同位素明显负偏,比细晶白云岩降低 2‰,而 C 同位素变化不明显,说明白云石化流体仍为残存的同期海水,也说明其成因与高温有关。

中-深埋藏条件下地层温度增高,抑制白云石形成的动力学因素大大减弱,有利于白云石的形成,但深埋藏条件下 Mg^{2+} 的供应有限,所以不能形成大量的白云石,可能选择性交代的方式形成不彻底白云石化作用的产物——过渡性岩类;也可能将先期形成的白云石经重结晶作用,形成中厚层状(块状)产出的纯白云岩。对纯的中-粗晶、它形白云岩来说,经历埋藏阶段多期次白云石化流体的改造作用,常形成环带状结构,成岩晚期的强还原条件以及大的白云石晶粒、曲面化的晶体边界,都指示研究区晶粒白云岩经历了封闭还原的中-深埋藏环境。

4.1.4 构造热事件热液改造阶段同位素特征

本次研究共分析了4件样品(表1),其 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值变化范围为 $-10.41\text{‰} \sim -8.56\text{‰}$,平均值为 -9.45‰ ; $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值变化范围为 $-0.09\text{‰} \sim 3.38\text{‰}$,平均值为 1.61‰ 。其 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值组成与同期灰岩、微粉晶白云岩相当或略低, $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值均低于同期灰岩、晶粒白云岩,说明鞍形白云石的成岩流体可能有外源流体的参与,大部分样品具有更低的 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值,可能与

更高的形成温度有关,结合岩石学特征及区域构造背景,鞍形白云石的成因流体及成因机制与青藏高原隆升过程中构造热事件提供的热源有关^[23]。

热液流体活动在布曲组不仅留下热液矿物痕迹,在其与布曲组碳酸盐岩相互作用过程中也会使碳酸盐岩矿物成分发生变化,热液白云石化成因的白云石晶体见洁净明亮带与污浊带间互的环带结构,明亮带与污浊带之间的接触界线为规则的直线型,表明二者形成时未受溶蚀作用影响,二者之间无间断,为连续形成^[48]。在显微镜下:鞍形白云石具波状消光特征,局部可见镰刀状消光,这一特征属于高温状态下的白云石,由于自身重力产生塑性流变变形所致;在与围岩关系上,鞍形白云石可与围岩呈突变接触,鞍形白云石沿切割基质白云岩的裂缝分布,两者之间界限明显,说明这类充填物形成于基质白云石之后,显示出非常强烈的后期改造特征,这在研究区最为常见;鞍形白云石也可与围岩呈渐变关系,即鞍形白云石充与围岩间的界限并不明显,通常在孔洞发育部位或在自由生长是才显示出鞍形白云石的特征,由于这部分鞍形白云石多发育在中-粗晶、它形白云岩中,因此两者在成因上可能具有相似性和继承性。

4.1.5 缝、洞充填物同位素特征

缝、洞充填物包括白云石和方解石(表1),细-中晶、自形白云石充填物 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值为 -5.31‰ , $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值为 3.02‰ ;7 件裂缝充填方解石脉 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值变化范围 $-13.04\text{‰} \sim -9.42\text{‰}$, 平均值为 -11.08‰ , $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值变化范围 $-1.35\text{‰} \sim 1.64\text{‰}$, 平均值为 -0.06‰ ;白云岩晶间孔充填的方解石 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值为 -5.38‰ , $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值为 3.73‰ 。细-中晶、自形白云石充填物和白云岩晶间孔充填的方解石,其 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值与晶粒白云岩相当, $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值介于细晶、自形白云石和细晶、半自形白云石之间,说明这种两种充填物形成的时间略早于细晶、半自形白云岩或与之相当。对白云岩晶间孔充填的方解石来说,可能在浅埋藏末期,地层流体中 Mg^{2+} 不足以继续发生过度白云石化作用, Ca^{2+} 与 CO_3^{2-} 结合形成 CaCO_3 沉淀,充填在白云岩晶间孔隙中。

细-中晶、自形白云石充填物,可能形成于浅埋藏末期或中-深埋藏阶段,主要为先期形成的白云石的经历重结晶作用形成,因为样品较少,难以说明问题。裂缝中充填方解石脉,其 C 和 O 同位素组成变化均较大, $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值甚至低于鞍形白云石,若形成于封闭的埋藏阶段,其沉淀时间越晚,形成温度越高,则 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})\text{‰}$ 负偏程度越高,相应的,经历高温改造的白云岩 O 同位素组

成也发生相应变化,这与研究观察到的现象明显不符,说明裂缝中充填方解石脉的成因流体与外来流体有关。结合区域构造演化背景,在高原隆升过程中,发育的断裂系统沟通了大气淡水,由于大气淡水的参与,形成的裂缝中充填方解石脉 C 和 O 同位素组成明显负偏。

4.2 锶同位素

研究区布曲组灰岩、大部分白云岩及白云石充填物的锶同位素组成与同期海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值($0.70710 - 0.70796$)相当^[31],说明形成这些白云岩的成因流体为同期蒸发海水,16D-14 样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值略高于同期海水,可能与高频相对海平面下降末期有地表径流进入有关。中-粗晶、它形白云石样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于 $0.707234 \sim 0.707865$,其 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值虽与准同生阶段、浅埋藏阶段形成的晶粒白云岩值相当,但在 Sr-C 同位素交汇图上(图4),明显分为两个区域,即 16D-01 和 16D-12 样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值明显低于其他白云岩样品,同时, Sr-O 同位素组成不具有协变性(表1),说明中-粗晶、它形白云岩的成因机制可能包括交代作用和重结晶作用2种:中-深埋藏阶段地层流体交代先驱灰岩,形成中-粗晶、它形白云石;先期形成的白云岩在中-深埋藏阶段经过重结晶形成中-粗晶、它形白云石,并且可能以重结晶作用为主,交代作用为辅。

细-中晶、自形白云石充填物及白云岩晶间孔充填的方解石,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值高于同期海水值,结合薄片鉴定结果,细-中晶、自形白云石充填物只发育在微粉

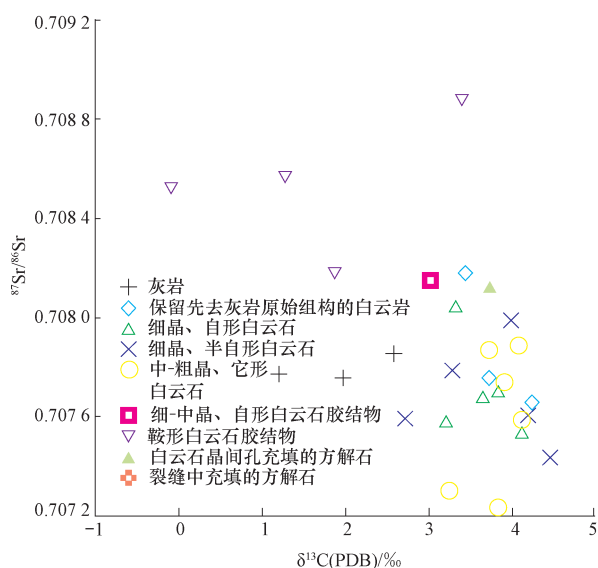


图4 羌塘盆地南坳陷布曲组不同类型白云岩 Sr-C 同位素交汇图

Fig. 4 The cross-plot of Sr and C isotope values for each type of the Buqu dolomites in southern depression of Qiangtang Basin

晶白云岩和细晶白云岩的晶间孔内壁,说明白云石充填可能与高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值先期白云岩重结晶有关;白云岩晶间孔充填的方解石的形成,可能与浅埋藏阶段具有高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值背景的白云石化作用过程相伴,继承了高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值特征。

鞍形白云石充填物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(0.708 18 ~ 0.708 876),普遍高于布曲组灰岩、白云岩、及白云石充填物,说明鞍形白云石的成因流体有外来流体的参与,外来流体流经布曲组上覆、下伏的碎屑岩地层,吸附大量放射性成因的 ^{87}Sr ,导致成因流体中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的升高。外来流体若仅为深部地层流体——高盐度的卤水,结合气液两相盐水包裹体测温数据:晶粒白云岩中包裹体的均一温度介于65.5 ~ 139.7 °C、冰点温度介于-13.0 ~ 20.3 °C(平均-17.8 °C),鞍形白云石中包裹体均一温度介于156.0 ~ 226.9 °C、冰点温度为-10.0 ~ 0.9 °C(平均为-4.4 °C),表明鞍形白云石的成因流体中有大气淡水的参与。结合青藏高原隆升过程,布曲组沉积以后,快速进入埋藏阶段,至早白垩世晚期,由于拉萨地块与羌塘地块的碰撞,在北羌塘坳陷以表现为挤压背景,但在南羌塘坳陷以近东西向剪切应力为主,形成深大断裂,大气淡水下渗至深部地层,再经过下伏地层进入布曲组白云岩,对地层流体进行稀释,同时俘获下伏雀莫错组碎屑岩地层中高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的流体,进而形成具 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的鞍形白云石沉淀。另外,研究区北部的赛帮集-那小祁优萨农根布曲组剖面中,可见安山玢岩侵入体,其侵入时间为78 ~ 64 Ma^[23],可能为鞍形白云石成因流体的热源,鞍形白云石稀土元素 δEu 异常的成因分析也证实构造热事件提供了热源^[25]。布曲组中发育的鞍形白云石充填物表明,研究区中侏罗统布曲组碳酸盐岩经历了大气淡水淋滤和热液改造,这对深埋藏条件下的碳酸盐岩储层中孔隙的形成、充填及保存具有重要意义,可能成为布曲组白碳酸盐岩储层评价提供新的方向。

5 结论

1) 羌塘盆地中侏罗统布曲组基质白云岩经历了准同生阶段—浅埋藏阶段—中—深埋藏阶段的叠加,白云石O同位素随着埋藏深度的增加而负偏,Sr同位素与同期海水相当,说明这一演化过程的白云石化流体为同期蒸发海水。在叠加构造热液改造之后,鞍形白云石充填物氧同位素进一步负偏,Sr同位素则重偏,说明此过程白云岩成因流体性质发生明显变化,有外来流体的加入。

2) 研究区准同生阶段白云石同位素特征反映了准同生期微粉晶白云石成因流体为同期高频相对海平面下降末期蒸发背景下咸化的高盐度海水。

3) 浅埋藏阶段形成的细晶白云岩、白云石及方解石充填物,以及中—深埋藏阶段的中—粗晶、它形白云岩,其成岩流体均为埋藏的同期蒸发海水。这种海水可以是正常盐度,也可以是中等盐度,在埋藏过程中因水—岩相互作用提高盐度,并随地层温度升高,能够突破白云石成核热力学屏障,对先驱灰岩进行交代,浅埋藏阶段形成的白云石充填物可能是先期白云岩经重结晶而来。白云石晶粒由自形向半自形的变化,是过度白云石化作用对空间竞争的结果,而晶体的非平面—曲面化是由温度升高引起,并且随着深度的增加,由于同位素分馏作用, $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)值明显下降,但 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)值变化不大。

4) 鞍形白云石的C、O和Sr同位素组成与准同生阶段、埋藏阶段白云岩的相应组成相差甚大,特别是O同位素明显较中—粗晶、它形白云岩负偏,Sr同位素组成也高于全球中侏罗统布曲组沉积期海水组成,说明形成鞍形白云石的成因流体有外来流体的参与,推测可能为大气淡水下渗至深部地层,再经下伏雀莫错组碎屑岩地层进入到布曲组中。

5) 裂缝内充填的亮晶方解石脉的C和O同位素组成,与白云石晶间孔中充填方解石、鞍形白云石的C氧同位素组成相比,差异较大,且 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)值明显负偏,说明有大气淡水参与,随着青藏高原快速隆升,断裂再一次沟通大气淡水,下渗的大气淡水在裂缝低势区形成的亮晶方解石沉淀。

参 考 文 献

- [1] Zhang F F, Xu H F, Hiromi Konishi, et al. Polysaccharide-catalyzed nucleation and growth of disordered dolomite: A potential precursor of sedimentary dolomite [J]. *American Mineralogist*, 2012, 97 (4): 556 ~ 567.
- [2] 宋金民, 刘树根, 李智武, 等. 四川盆地上震旦统灯影组微生物碳酸盐岩储层特征与主控因素 [J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38 (4): 741 ~ 752.
Song Jinmin, Liu Shugen, Li Zhiwu, et al. Characteristics and controlling factors of microbial carbonate reservoirs in the Upper Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin, China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38 (4): 741 ~ 752.
- [3] 倪新锋, 黄理力, 陈永权, 等. 塔中地区深层寒武系盐下白云岩储层特征及主控因素 [J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38 (3): 489 ~ 498.
Ni Xinfeng, Huang Lili, Chen Yongquan, et al. Characteristics and main controlling factors of the Cambrian pre-salt dolomite reservoirs in Tazhong Block, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38

- (3):489-498.
- [4] 何治亮,张军涛,丁茜,等. 深层-超深层优质碳酸盐岩储层形成控制因素[J]. 石油与天然气地质,2017,38(4):633-644.
He Zhiliang, Zhang Juntao, Ding Qian, et al. Factors controlling the formation of high-quality deep to ultra-deep carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4):633-644.
- [5] 李开开,张学丰,贺训云,等. 川东北飞仙关组白云岩化作用对鲕粒滩储层的孔隙改造效应[J]. 石油与天然气地质,2018,39(4):706-718.
Li Kaikai, Zhang Xuefeng, He Xunyun, et al. Modification of dolomitization on pores in oolitic shoal reservoirs of the Feixianguan Formation in the northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(4):706-718.
- [6] Bosence D. Carbonate reservoirs porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework[J]. Marine and Petroleum Geology, 2002, 19(10):1295-1296.
- [7] Davies G R, Smith L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11):1641-1690.
- [8] Ronchi P, Masetti D, Tassan S, et al. Hydrothermal dolomitization in platform and basin carbonate successions during thrusting: A hydrocarbon reservoir analogue (Mesozoic of Venetian Southern Alps, Italy)[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 29(1):0-89.
- [9] 钱一雄,田蜜,李慧莉,等. 喜马拉雅中晚期断弯褶皱-大气水岩溶储集体形成——以塔里木盆地西北缘柯坪-羊吉坎大湾沟组碳酸盐岩为例[J]. 石油与天然气地质,2019,40(4):738-751.
Qian Yixiong, Tian Mi, Li Huili, et al. Formation of fault bend fold-controlled meteoric karst reservoir in the middle and late Himalayan movement: A case study of the Dawangou Formation carbonate rocks at Yangjikan section, Keping, northwestern Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(4):738-751.
- [10] 吕修祥,陈佩佩,陈坤,等. 深层碳酸盐岩差异成岩作用对油气分层聚集的影响——以塔里木盆地塔中隆起北斜坡鹰山组为例[J]. 石油与天然气地质,2019,40(5):957-971.
Lyu Xiuxiang, Chen Peipei, Chen Kun, et al. Effects of differential diagenesis of deep carbonate rocks on hydrocarbon zonation and accumulation: A case study of Yingshan Formation on northern slope of Tazhong uplift, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5):957-971.
- [11] 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):47-51.
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.
- [12] 李启来,伊海生,梁定勇,等. 羌塘盆地隆鄂尼-昂达尔错地区中侏罗统布曲组碳酸盐岩储层特征研究[J]. 科学技术与工程,2014,14(31):183-188.
Li Qilai, Yi Haisheng, Liang Dingyong, et al. Study on reservoir characteristics of the carbonate rocks in the Middle Jurassic Buqu Formation in Longeni-Angdaercuo Area, Qiangtang Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(31):183-188.
- [13] 王成善,胡承祖,吴瑞忠,等. 西藏北部查桑-茶布裂谷的发现及其地质意义[J]. 成都地质学院学报,1987,14(2):36-49,124.
Wang Chengshan, Hu Chengzu, Wu Ruizhong, et al. Significance of the discovery of Chasang-Chabu rift in northern Xizang (Tibet)[J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1987, 14(2):36-49, 124.
- [14] 付修根,廖忠礼,刘建清,等. 南羌塘盆地扎仁地区中侏罗统布曲组沉积环境特征及其对油气地质条件的控制作用[J]. 中国地质,2007,34(4):600-604.
Fu Xiugen, Liao Zhongli, Liu Jianqing, et al. Sedimentary environment of the Middle Jurassic Buqu Formation and its controls on petroleum geology in the Zaring area, southern Qiangtang basin[J]. Geology in China, 2007, 34(4):600-604.
- [15] 朱井泉. 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.
- [16] 张立强,纪友亮,李永铁,等. 羌塘盆地侏罗系白云岩储层特征研究[J]. 石油实验地质,2001,23(4):385-389.
Zhang Liqiang, Ji Youliang, Li Yongtie. Reservoir characteristics of the Jurassic dolomite in the Qngtang Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23(4):384-389.
- [17] 彭智敏,廖忠礼,陈明,等. 青藏高原羌塘盆地侏罗系白云岩的特征及成因[J]. 沉积与特提斯地质,2008,28(4):1-6.
Peng Zhimin, Liao Zhongli, Chen Ming, et al. Origin of the Jurassic dolomite reservoirs in the Qiangtang Basin on the Qinghai Xizang Plateau[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2008, 28(4):1-6.
- [18] 刘建清,陈文斌,杨平,等. 羌塘盆地中央隆起带南侧隆鄂尼-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-Angdanro paleo-oil dolomite geochemical characteristics in southern part of the central uplift zone of Qiangtang Basin and its significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(6):1379-1389.
- [19] 刘建清,贾保江,杨平,等. 羌塘盆地中央隆起带南侧隆鄂尼-昂达尔错布曲组古油藏白云岩稀土元素特征及成因意义[J]. 沉积学报,2008,26(1):28-38.
Liu Jianqing, Jia Baojiang, Yang Ping, et al. Characteristics of the paleo-oil dolomite REE geochemistry of Buqu Formation in southern part of the central uplift zone of Qiangtang Basin and its significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(1):28-38.
- [20] 刘建清,陈文斌,杨平,等. 羌塘盆地隆鄂尼-昂达尔错古油藏的白云岩组构特征及铅同位素意义[J]. 地球学报,2008,29(1):72-80.
Liu Jianqing, Chen Wenbin, Yang Ping, et al. The dolomite fabric characteristics and lead isotope significance of the ancient oil accumulation in Long'eni-Angdar Lake, Qiangtang Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29(1):72-80.
- [21] 刘建清,杨平,陈文彬,等. 羌塘盆地中央隆起带南侧隆鄂尼-昂达尔错布曲组古油藏白云岩特征及成因机制[J]. 地质前缘(中国地质大学(北京):北京大学),2010,17(1):312-321.

- Liu Jianqing, Yang Ping, Chen Wenbin, et al. The characteristics of Longeni-Angdaercuo paleo-oil dolomite in southern part of the central uplift zone of Qiangtang Basin and its forming mechanism[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(1): 311–321.
- [22] 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.
- [23] 万友利, 王剑, 付修根, 等. 羌塘盆地南部古油藏带布曲组白云岩地球化学特征及成因机制[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(2): 4–16.
- Wan Youli, Wang Jian, Fu Xiugen, et al. The geochemical characteristics and mechanism of dolomite in the paleo-reservoir Buqu Formation, south Qiangtang Basin, Tibet, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2018, 45(2): 4–16.
- [24] 万友利, 王剑, 谭富文, 等. 羌塘盆地隆鄂尼—昂达尔错地区布曲组白云岩储层成因及孔隙演化特征[J]. *东北石油大学学报*, 2017, 41(6): 21–33.
- Wan Youli, Wang Jian, Tan Fuwen, et al. Dolomite reservoir formation mechanism and pore evolution feature of the Buqu formation in the Long'eni-Angdaercuo area, Qiangtang basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2017, 41(6): 21–33.
- [25] 万友利, 王剑, 万方, 等. 羌塘盆地南部古油藏带布曲组碳酸盐岩稀土元素特征及意义[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(5): 655–665.
- Wan Youli, Wang Jian, Wan Fang, et al. Characteristics and indications of rare earth elements in carbonates in the Buqu Formation, southern Qiangtang Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(5): 655–665.
- [26] 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): 25–37.
- 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): 25–37.
- [27] 邓希光, 张进江, 张玉泉, 等. 藏北羌塘地块中部蓝片岩中捕获锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义[J]. *地质通报*, 2007, 26(6): 698–702.
- Deng X G, Zhang J J, Zhang Y Q, et al. SHRIMP U-Pb dating of zircons from blueschist in the central part of the Qiangtang block, northern Tibet, China, and its implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(6): 698–702.
- [28] 谭富文, 张润合, 王剑, 等. 羌塘晚三叠世—早白垩世裂陷盆地基底构造[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(5): 513–521.
- Tan Fuwen, Zhang Runhe, Wang Jian, et al. Discussion on basement structures of the late Triassic-early Cretaceous Qiangtang rift basin in Tibet, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2016, 43(5): 513–521.
- [29] Gregg J M, Sibley D F. Epigenetic dolomitization and the origin of Xenotopic dolomite texture [J]. *Journal Of Sedimentary Research*, 1984, 54(3): 908–931.
- [30] None. Classification of dolomite rock textures; Sibley, D F; Gregg, J M J *Sediment Petrol* V57, N6, Nov 1987, P967–975 [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1988, 25(3): 122–0.
- [31] 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: 59–88.
- [32] 钱一雄, 蔡立国, 李国蓉, 等. 碳酸盐岩岩溶作用的元素地球化学表征——以塔河1号的S60井为例[J]. *沉积学报*, 2002, 20(1): 70–75.
- Qian Yixiong, Cai Liguang, Li Guorong, et al. Element geochemical implications for carbonate karstification interpretation—Taking Well S60 in Taihe as an example[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(1): 70–75.
- [33] 邵龙义, 窦建伟, 张鹏飞. 西南地区晚二叠世氧、碳稳定同位素的古地理意义[J]. *地球化学*, 1996, 25(6): 575–581.
- Shao Longyi, Dou Jianwei, Zhang Pengfei. Paleogeographic significances of carbon and Oxygen isotopes in late Permian rocks of southwest China[J]. *Geochimica*, 1996, 25(6): 575–581.
- [34] 崔秉奎, 卢武长, 杨绍全. 上扬子石炭纪锶、碳同位素和微量元素铝与海平面变化的关系[J]. *成都地质学院报*, 1993, 20(3): 33–37.
- Cui Bingquan, Lu Wuchang, Yang Shaoquan. The relationship between Sr, C isotopes, trace element Al and sea level fluctuation of Carboniferous in upper Yangtze Platform [J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 1993, 3: 33–37.
- [35] Allan J R, Matthews R K. Isotope signatures associated with early meteoric diagenesis[J]. *Sedimentology*, 1982, 29(6): 797–817.
- [36] 张秀连. 碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度、古水温的关系[J]. *沉积学报*, 1985, 3(4): 17–30.
- Zhang Xiulian. Relationship between Carbon and Oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1985, 3(4): 17–30.
- [37] Lonner 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.
- [38] 孟祥豪, 张哨楠, 蔺军, 等. 塔深1井寒武系白云岩储层同位素流体地球化学示踪[J]. *矿物岩石*, 2009, 29(4): 75–82.
- Meng Xianghao, Zhang Shaonan, Lin Jun, et al. Geochemical tracing of isotopic fluid of the Cambrian dolomite reservoir in well Tashen 1 [J]. *J mineral petrol*, 2009, 29(4): 75–82.
- [39] McArthur J M, Burnett J, Hancock J M. Strontium isotopes at K/T boundary[J]. *Nature*, 1992, 355(6355): 28–28.
- [40] 黄擎宇, 张哨楠, 孟祥豪, 等. 塔里木盆地中央隆起区寒武—奥陶系白云岩结构特征及成因探讨[J]. *沉积学报*, 2014, 32(3): 537–549.
- Huang Qingyu, Zhang Shaonan, Meng Xianghao, et al. Textural types and origin of the Cambrian-Ordovician dolomite in the Central Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(3): 537–549.
- [41] Fu X G, Wang J, Feng X L, et al. Early Jurassic carbon-isotope ex-

- cursion in the Qiangtang Basin(Tibet), the eastern Tethys; Implications for the Toarcian Oceanic anoxic event[J]. *Chemical Geology*, 2016, 442: 62–72.
- [42] Fu X G, Wang J, Zeng S Q, et al. Continental weathering and palaeoclimatic changes through the onset of the Early Toarcian oceanic anoxic event in the Qiangtang Basin, eastern Tethys[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 487: 241–250.
- [43] 谭富文, 王剑, 王小龙, 等. 羌塘盆地雁石坪地区中-晚侏罗世碳、氧同位素特征及沉积环境分析[J]. *地球学报*, 2004, 25(2): 119–126.
- Tan Fuwen, Wang Jian, Wang Xiaolong, et al. Analysis of carbon oxygen isotope composition and sedimentary environment of the Yanshiping area of the Qiangtang Basin in Middle-Late Jurassic[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2004, 25(2): 119–126.
- [44] 谢渊, 王剑, 刘家铎, 等. 羌塘盆地那底岗日地区中侏罗世层序地层与碳、氧、锶同位素响应[J]. *沉积学报*, 2002, 20(2): 12–20.
- Xie Yuan, Wang Jian, Liu Jiaduo, et al. Carbon, Oxygen and strontium isotopic responses of carbonate rocks and the Middle Jurassic sequence stratigraphy in the Nadigangri Area, Qiangtang Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(2): 12–20.
- [45] Major R P, Lloyd R M, Lucia F J. Oxygen isotope composition of Holocene dolomite formed in a humid hypersaline setting[J]. *Geology*, 1992, 20(7): 586–588.
- [46] Jones B. Dolomite crystal architecture: genetic implications for the origin of the Tertiary dolostones of the Cayman Islands[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2005, 75(2): 177–189.
- [47] Qing H R, Mountjoy E W. Multistage dolomitization in Rainbow build-ups, Middle Devonian Keg River Formation, Alberta, Canada[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1989, 59(1): 114–126.
- [48] Durocher S, Al-Aasm I S. Dolomitization and neomorphism of Mississippian(Visean) upper debolt formation, Blueberry field, northeastern British Columbia: Geologic, petrologic, and chemical evidence[J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(6): 954–977.

(编辑 张亚雄)

(上接第143页)

- [23] 朱东亚, 金之钧, 胡文瑄. 塔北地区下奥陶统白云岩热液重结晶作用及其油气储集意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(2): 156–170.
- Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wenxuan. Hydrothermal recrystallization of the Lower Ordovician dolomite and its significance to reservoir in northern Tarim Basin[J]. *Science China: Earth Science*, 2010, 40(2): 156–170.
- [24] Effenberger H, Mereiter K, Zemann J. Crystal structure refinements of magnesite, calcite, rhodochrosite, siderite, smithonite, and dolomite, with discussion of some aspects of the stereochemistry of calcite type carbonates[J]. *Zeitschrift Fur Kristallographie*, 1981, 156: 233–243.
- [25] 蒋裕强, 谷一凡, 李开鸿, 等. 四川盆地中部中二叠统热液白云岩储渗空间类型及成因[J]. *天然气工业*, 2018, 38(2): 16–24.
- Jiang Yuqiang, Gu Yifan, Li Kaihong, et al. Spacetypes and origins of hydrothermal dolomite reservoirs in the Middle Permian strata, Central Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(2): 16–24.
- [26] 张学丰, 李晓峰, 李宗杰, 等. 白云岩的残余结构及其沉积相的意义——以塔中地区中-下奥陶统为例[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(4): 722–728.
- Zhang Xuefeng, Li Xiaofeng, Li Zongjie, et al. Relict texture of dolostones and its significance to sedimentary facies: A case study from the Middle-Lower Ordovician in Tazhong area, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(4): 722–728.
- [27] 唐雪松, 谭秀成, 刘宏, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组白云岩及云质硅岩储层特征与发育规律[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(5): 731–743.
- Tang Xuesong, Tan Xiucheng, Liu Hong, et al. Characteristics and development mechanism of dolomite and dolomitic quartzite reservoirs of the Middle Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(5): 731–743.

(编辑 张亚雄)