

doi: 10.12029/gc20190216

田康志, 季长军, 伊海生, 谭梅, 金峰, 范立顺. 2019. 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, 46(2): 398–406.
Tian Kangzhi, Ji Changjun, Yi Haisheng, Tan Mei, Jin Feng, Fan Lishun. 2019. Origin of grained dolomite from the Buqu Formation of Zaring area in southern Qiangtang depression[J]. Geology in China, 46(2): 398–406. (in Chinese with English abstract).

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

田康志¹, 季长军^{2,3,4}, 伊海生¹, 谭梅⁵, 金峰⁶, 范立顺⁶

(1. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
3. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081; 4. 中国地质科学院页岩油气调查评价重点实验室, 北京 100081;
5. 重庆自然博物馆, 重庆 400700; 6. 甘肃勘探者地质矿产有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要:以青藏高原南羌塘坳陷扎仁地区中侏罗统布曲组晶粒白云岩为对象对其进行成因的研究。通过显微镜观察、流体包裹体数据以及碳氧同位素分析,认为研究区白云岩可分为细粉晶白云岩、中晶白云岩以及粗晶白云岩,在裂隙附近还广泛发育晶粒较粗大的鞍形白云石。白云石中流体包裹体均一温度在150.2~216.0℃,盐度均值达到了24.5%NaCl,远高于方解石包裹体均一温度与盐度,表明白云石的形成经历了高温高盐度的过程。白云石碳氧同位素分析显示其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为-0.01‰~3.43‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值为-11.17‰~-7.68‰,通过白云石-水氧同位素分馏方程得到白云化流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为4.82‰~12.85‰, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 对比认为白云石受寄主灰岩环境的影响。通过碳氧同位素数据对比以及前人的研究结果,认为研究区白云岩为相对封闭环境下受岩浆活动加热的高盐度流体对寄主灰岩交代的产物,高盐度流体由于镁离子的消耗导致流体对方解石过饱和,继而沉淀了高温的方解石。因此,热液活动对研究区中侏罗统布曲组白云岩的发育具有重要意义,值得加强对这一方向的探索研究。

关键词:流体包裹体;碳氧同位素;白云石;布曲组;扎仁地区

中图分类号:P588.24⁵ 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2019)02-0398-09

Origin of grained dolomite from the Buqu Formation of Zaring area in southern Qiangtang depression

TIAN Kangzhi¹, JI Changjun^{2,3,4}, YI Haisheng¹, TAN Mei⁵, JIN Feng⁶, FAN Lishun⁶

(1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 3. Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction of Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 4. Key Lab of Shale Oil and Gas Geological Survey, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 5. Chongqing Natural Museum, Chongqing 400700, China; 6. Gansu Kantanzhe Geology and Mineral Resources Co., Ltd., Lanzhou 730000, Gansu, China)

收稿日期:2017-09-06;改回日期:2018-03-14

基金项目:中国地质调查局项目“羌塘盆地隆鄂尼-鄂斯玛地区油气地质构造调查”(121201010000150014)资助。

作者简介:田康志,男,1992年生,硕士生,沉积学与岩相古地理专业,主要从事沉积学研究;E-mail:tiankangzhiwd@126.com。

通讯作者:季长军,男,1986年生,助理研究员,现从事沉积地质与油气地质研究工作;E-mail:286648795@qq.com。

Abstract: The genetic mechanism of dolomite of the Middle Jurassic Buqu Formation in the Qiangtang depression was studied by using microscopy, fluid Inclusion data, and carbon and oxygen isotope analysis. The results show that the dolomites in the study area can be divided into fine-powdery dolomite, medium dolomite and coarse dolomite according to grain size. Dolomite generally has a fogged center and clear margin structure, in the cracks near the extensive development of grained saddle dolomite. Fluid inclusions in the dolomite have homogenization temperature ranging between 150.2 and 216.0°C and average salinity of 24.5% NaCl, much higher than the homogenization temperature and salinity of fluid inclusions in calcite, indicating a high temperature and high salinity diagenetic environment. The isotopic analysis shows that $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values vary from -0.01‰ to 3.43‰, and $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ values vary from -11.17‰ to -7.68‰; according to the dolomite-fluid oxygen isotope fractionation equation, the $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ values of dolomitization fluid are in the range of 4.82‰-12.85‰. It is believed that the matrix dolomite and the saddle dolomite that are filled in the pores in the study area are the products of host limestone altered by the high salinity fluid heated by the magma activity in a close environment, while the high salinity fluid due to the consumption of magnesium ions led to over-saturation of fluid calcite and then to the precipitation of high-temperature calcite. Therefore, hydrothermal activity was very significant for the development of dolomite of the Middle Jurassic Buqu Formation in the study area.

Key words: fluid inclusion; carbon and oxygen isotope; dolomite; Buqu Formation; Zaring area

About the first author: TIAN Kangzhi, male, born in 1992, master candidate, engages in the research on sedimentology. E-mail: tiankangzhiwd@126.com.

About the corresponding author: JI Changjun, male, born in 1986, assistant researcher, engages in depositional geology and oil and gas geology research. E-mail: 286648795@qq.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. 121201010000150014).

1 引言

羌塘盆地位于青藏高原北部的无人区,盆地总面积约为18万 km^2 ,是青藏高原最大的中生代海相沉积盆地,盆地内拥有巨大的油气资源潜力(赵政璋等,2000;王成善等,2001;赵文津等,2006;王剑等,2009)。羌塘盆地内最好的含油层系位于中侏罗统布曲组,其在地表存在较好油气显示的白云岩均为晶粒白云岩,且累计厚度较大。布曲组地层中的石油地质储量与石油可采储量在羌塘盆地内的各个地层单元中均居于首位,分别为 $17.78 \times 10^8 \text{ t}$ 与 $3.66 \times 10^8 \text{ t}$ (刘家铎等,2007)。仅在双湖地区的毕洛错—昂达尔错古油藏带中,白云岩的累计厚度就普遍超过150 m,局部地区甚至超过400 m,白云岩作为优质储层,具有非常良好的油气勘探远景(邓燕等,2017)。尽管布曲组白云岩是南羌塘坳陷最重要的油气储集体,但是目前对于其成因仍存在较大争议。朱井泉等(2000)在早期研究中曾将这一地区白云岩解释为同生沉淀成因。后来又有伊海生等(2004)、张小青等(2005)、陈文彬等(2006)、刘建清等(2006,2008)通过研究分析认为其是混合水成因形成的;之后伊海生等(2014)又通过稳定同位

素与流体包裹体分析认为这一地区含油白云岩是埋藏成因的;最近万友利等(2017)根据薄片鉴定、扫描电镜以及地球化学资料相结合分析认为,羌塘盆地中侏罗统布曲组白云岩经过准同生阶段、浅埋藏阶段、中—深埋藏阶段以及构造热液阶段等多期次白云化作用叠加形成。隆鄂尼—昂达尔错一线大面积的古油藏白云岩带的发现证明羌塘盆地存在大规模的油气聚集,而区内较高孔隙度和渗透率的白云岩作为其优质储层,针对白云岩成因,形态的分析研究对盆地内油气成藏机理研究的助力是不容忽视的。因此,本文在前人的研究基础之上,通过对研究区晶粒白云岩显微结构的观察,结合碳氧同位素、包裹体测温等分析手段对南羌塘坳陷扎仁地区的晶粒白云岩成因进行分析与讨论,以期对羌塘盆地中侏罗统白云岩成因机制提供可靠的证据。

2 区域地质概况

经前人的调查与研究,羌塘盆地的地表油藏带存在明显的“东西分区、南北分带”的特征,油藏带主要富集于东西向展布的3个区块,分别是西部的隆鄂尼区块、中部的昂达尔错区块和东部的赛仁区块,各区块范围的油藏带又由南北向不同的油藏出

露组成(季长军等,2016;万友利等,2017)。而扎仁古油藏带则位于中部的昂达尔错区块内,东起作尔当夏乃赛,西至柔刹玛日包,北抵日阿梗,南至巴乃玛尔沟。研究区北部出露三叠纪地层,中部及南部出露侏罗纪地层,其中,布曲组白云岩主要出露在坳陷中部地区,成层性好,且常在层内伴生有介壳灰岩、鲕粒灰岩、生屑灰岩,显示出典型开阔台地与碳酸盐台地边缘滩沉积特征(夏国清等,2017;王剑等,2018)。研究区白云岩主要出露在扎仁、碾碾以及加木尔且地区(图1),其中扎仁山和其南部的碾碾地区是研究区白云岩富集区,白云岩近东西向展布,野外出露厚度较大,延伸均较稳定,东西向出露长度超过5 km。

3 测试方法

所测试的样品为扎仁地区采集到的晶粒白云岩与灰岩,制备样品磨制普通薄片并保留副样,观察岩石结构之后,挑选出典型样品磨制包裹体薄片。样品的流体包裹体测试分析由长江大学地球科学学院完成,包裹体样品分析仪是英国Linkam公司最新产品 THMS 600G 冷热台,加热/冷冻速率0.01~130℃/min,配备显微镜为日产Olympus,另配100倍8 mm长焦工作镜头,该仪器分析精度可达±0.1℃。在加热与降温过程中,控温速率一般为

20℃/min,在相变点附近速率控制为4℃/min。

岩石碳氧同位素样品的制备采用牙钻将与薄片对应的副样进行微区取样,再将样品置于玛瑙钵中研磨,并用200目筛子筛选,此过程中每次磨制样品完毕使用脱脂棉蘸取无水乙醇对玛瑙钵及筛子擦拭清洁。岩石碳氧同位素样品由四川煤田地质局分析完成,采用的是磷酸盐法,将0.1 mg样品烘干放入样品管并密封,之后通入纯氮气待样品管中的空气排净,加入过量的100%磷酸,将产生的CO₂气体引入MAT253质谱测试仪中测试C、O同位素组成,同位素测量采用PDB标准。该方法测得的C、O同位素精度控制在±0.1‰与±0.2‰。

4 岩石学特征

扎仁地区白云岩主要为晶粒较粗白云岩,晶粒结构,薄—中厚层状构造(图2a),局部可见水平纹层(图2b),还可见介壳灰岩(图2c),出露于地表的含油气的白云岩常常因风化作用而呈棕色—黄褐色(图2d)。白云岩常与介壳灰岩和鲕粒灰岩、核形石灰岩等伴生产出,暗示其产出于鲕粒滩和介壳滩沉积环境。研究区布曲组白云岩多为晶粒白云岩、介壳白云岩等,晶粒较粗,细小晶粒的白云岩较少见。研究区白云岩从粉—细晶白云岩到中—粗晶白云岩均有发育,白云石中大量雾心亮边白云石以及

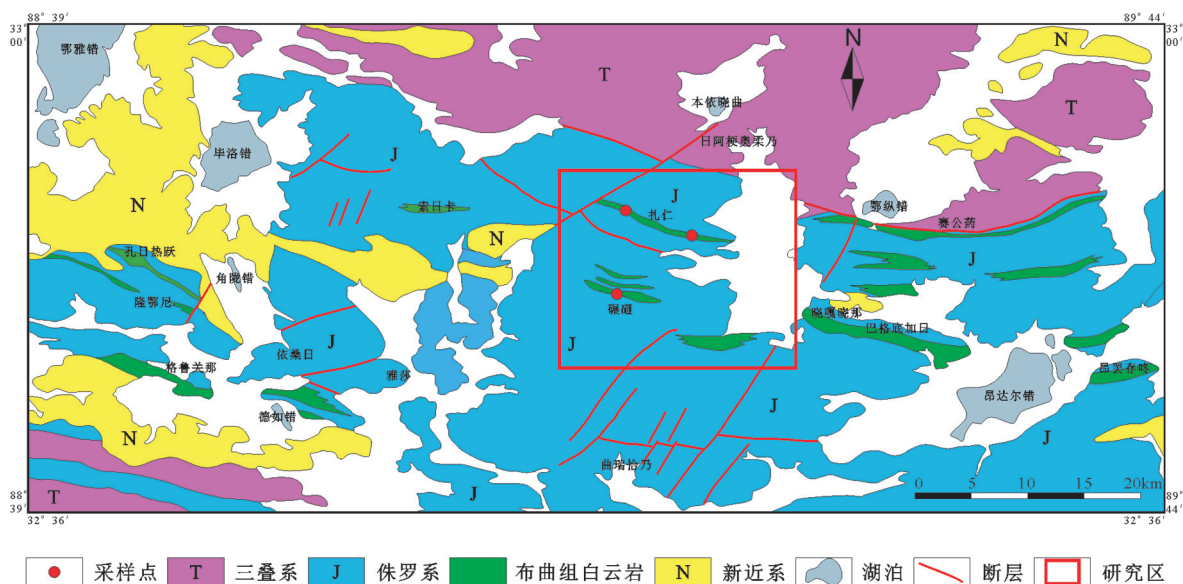


图1 扎仁地区布曲组白云岩分布及采样位置图

Fig.1 Distribution and sampling location of dolostones of Buqu Formation in Zaring area

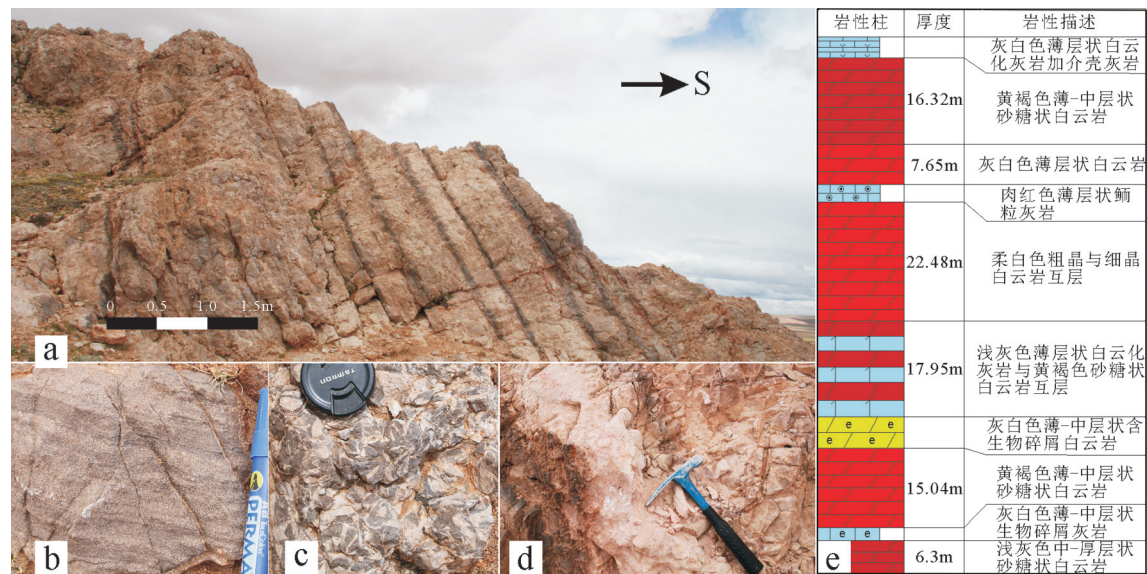


图2 扎仁地区布曲组白云岩野外露头及柱状图
a—白云岩宏观露头照片;b—具水平纹层的白云岩;c—介壳白云岩;d—地表被风化白云岩;e—柱状图
Fig.2 Dolomite outcrops and stratigraphic column of Buqu Formation in Zaring area
a—Macroscopic outcrop photo of dolomite; b—Dolomite with horizontal lamina; c—Shell dolomite; d—Weathered dolomite;
e— Columnar section of Buqu Formation

少量的鞍形白云石。本文按照晶粒大小将白云岩划分为细-粉晶白云岩,中晶白云岩以及粗晶白云岩3类。

细-粉晶白云岩晶形较差,常含少量交代生物碎屑而形成的残余结构(图3a)。该类白云石在研究区分布较少,白云石雾状核心部分占主体,呈褐色,明亮环边较窄,次生加大作用使白云石颗粒呈规则的自形菱面体生长。这类岩石中的白云石还可以发现环带构造,多为结构简单的环带,环带边缘较为明亮。

中晶白云岩单偏光显微镜下多数白云石可见雾心亮边结构,晶体间多呈凹凸形-直线形接触(图3b)。孔隙发育的部位还可见环带白云石和他形白云石充填。白云岩中孔隙较发育,除了白云石原生晶间孔外,次生晶间溶蚀孔和溶蚀缝洞也较为发育。该类白云石在研究区分布较少。

粗晶白云岩多为他形白云石(图3c),主要为半自形-他形晶粒状镶嵌结构,靠近孔隙的白云石可出现环带构造,常见棘屑残余及生物碎屑幻影。该类白云岩为研究区分布最为广泛的白云岩。

在裂隙较为发育的白云岩中,可见晶粒较为粗大的鞍形白云石(图3d),鞍形白云石与较细粒白云石形

成了具有双峰态的不等晶结构。通过白云岩镜下研究,这类白云石晶粒不等的结构的形成与原始沉积物的组构的差异性存在紧密的联系,其形成主要受成岩过程中重结晶以及构造挤压作用的影响。

5 流体包裹体测温与盐度

通过显微镜下观察白云岩中的包裹体,可以发现多种形态的流体包裹体颗粒,矩形、三角形、短柱状、不规则状均有产出,大小主要集中在2~8 μm。本次研究的包裹体在方解石与白云石中均有发现,白云石内的包裹体主要分布在粗晶白云岩以及鞍形白云石内部,包裹体类型主要为含盐水包裹体。

一般来说,岩石中包裹体的均一温度可以反映岩石成岩时成岩流体的温度。成岩流体温度的不同,其所对应的白云岩形成方式也不同。通常以60℃为界,成岩流体温度低于60℃时为冷水白云化,如蒸发泵白云化作用、混合水白云化作用等;高于60℃时为热水白云化,如埋藏白云化、热液白云化。

通过测试分析(表1),测得粗晶白云石盐水包裹体温度数据36个,均一温度的分布范围在150.2~216.0℃,平均均一温度为171.70℃,平均盐度值为

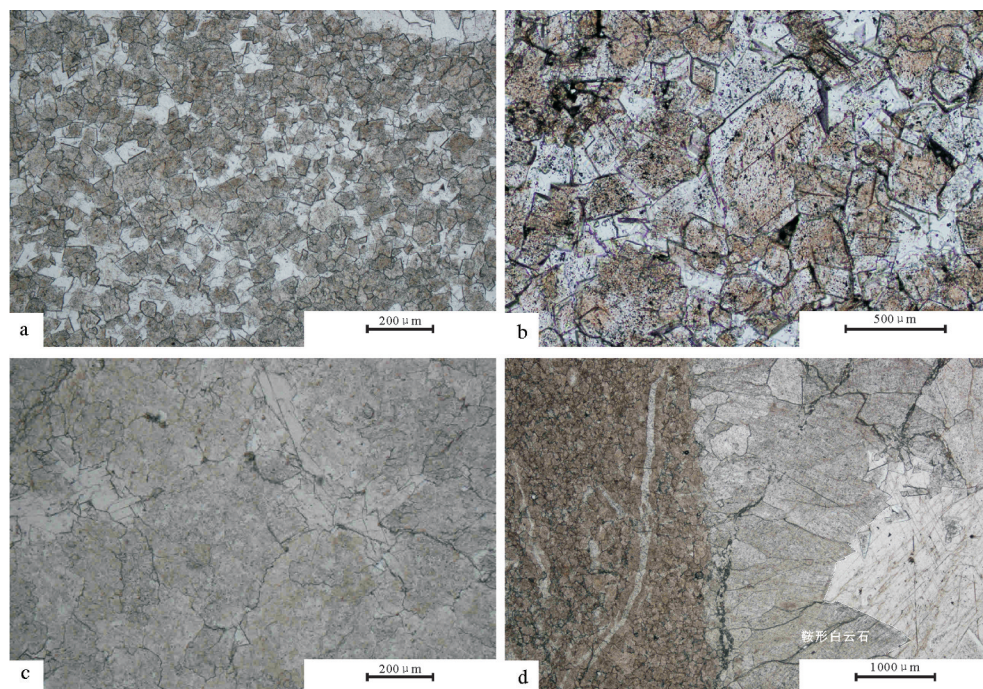


图3 布曲组白云岩显微照片(单偏光)

a—细粉晶白云岩;b—中晶白云岩,白云石具雾心亮边结构;c—粗晶白云岩;d—粉晶白云岩与裂隙附近的鞍形白云石构成不等晶结构

Fig.3 Photomicrographs of dolomite from Buqu Formation

a—Powder-fine crystallographic dolostone;b—Medium crystallographic dolomite, dolomite having a bright edge structure with fog;c—Coarse crystallographic dolomite;d—Powder crystallographic dolomite combined with the void-filling saddle dolomite to form crystal structure

24.78%;测得鞍形白云石包裹体温度数据8个,温度介于152.8~174.1℃,平均均一温度为163.73℃,盐度平均值为23.33%。这些数据可以代表后期白云化流体的温度和盐度。而白云岩中充填于裂隙以及溶洞中的方解石均一温度分布范围为57.4~145.5℃,部分方解石温度较高,为高温方解石,平均均一温度为101.2℃,平均盐度仅为6.41%。说明白云石形成时环境的温度与盐度均比灰岩和白云岩中的方解石高。

本次流体包裹体总共测得白云石包裹体温度数据44个,方解石温度数据42个,建立温度分布直方图(图4)可以看出,样品中方解石包裹体温度分布频数呈倒“V”字分布,主峰温度在110℃,白云石包裹体中则呈倒序分布,主峰温度为160℃。白云石与方解石温度的分布区间不重合,白云石的高温分布与方解石的低温分布显示出明显的对比。

6 碳氧同位素

因为晶粒较粗的白云岩为研究区最主要的白云岩类型,因此本文对这些白云岩进行了碳氧同位

素分析(表2),结果显示 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值介于-0.01‰~3.43‰,均值为1.68‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值介于-11.17‰~-7.68‰,均值为-9.26‰。由于碳同位素的变化与温度的关系不明显,主要取决于生物分馏作用、成岩流体中稳定碳同位素成分等的影响(孟森等,2017),研究区布曲组白云岩的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 的值与灰岩的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 范围0.9‰~3.0‰(谭富文等,2004;刘建清等,2007)较为接近,表明白云石受寄主岩石环境的影响(张军涛等,2011)。白云岩 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 负偏较强说明这类白云石受到了热液作用、深埋藏作用的影响,使白云岩的成岩温度较高,从而加强了氧同位素的热分馏作用,使得 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值具有明显的负向偏移的趋势(雷和金等,2016)。

7 讨论

石灰岩中裂隙和孔洞充填的方解石,代表正常地温梯度条件下岩石埋藏过程中经历的温度变化,温度分布范围较广(最高值与最低值差距可达100℃),反映这些方解石矿物可能是在不同埋藏深度通过交代作用和化学沉淀形成的,可能包括有成

表1 白云石与方解石流体包裹体均一温度与盐度分析结果

Table 1 Analytical data of homogenization temperature and salinity of fluid inclusions in dolomite and calcite

样品编号	岩性	宿主矿物	包裹体类型	均一温度/℃	盐度/ wt%NaCl	观测点数
				分布范围(平均温度)		
ZP01-12BT1	粗晶白云岩	白云石	盐水	151.9~168.4(159.2)	25	15
		裂隙中鞍形白云石	盐水	152.8~159.3(155.9)	23.33	4
ZP01-13BT1	灰岩	裂隙中鞍形白云石	盐水	168.2~174.1(171.6)	/	4
		基质白云石	盐水	150.2~158.9(153.9)	22.1	4
ZP02-11BT1	灰岩	裂缝充填方解石	盐水	100.2~112.6(106.4)	7.98	10
		裂缝充填方解石	盐水	132.5~145.5(138.8)	/	5
ZP02-13BT1	粗晶白云岩	白云石	盐水	169.5~191.5(180.5)	25.62	13
ZP03-02BT	中-粗晶白云岩	溶孔充填方解石	盐水	78.2~85.5(81.9)	/	2
		裂缝充填方解石	盐水	100.5~115.3(107.2)	5.68	14
		溶孔充填方解石	盐水	57.4~62.7(60.0)	4.77	3
ZP03-10BT1	中-粗晶白云岩	溶孔充填方解石	盐水	77.2~85.5(81.0)	6.68	8
		白云石	盐水	200.1~216.0(207.9)	/	4

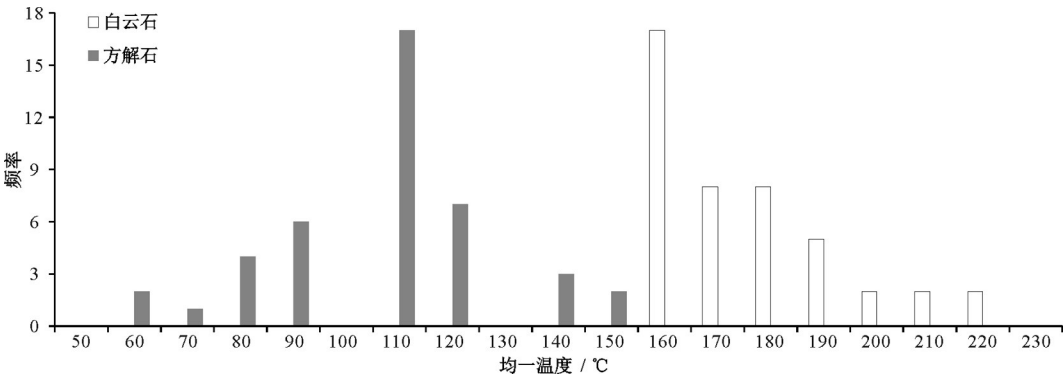


图4 白云石与方解石包裹体均一温度分布直方图

Fig.4 Homogenization temperature histogram of fluid inclusions from dolomites and calcite

表2 布曲组白云岩碳氧同位素分析结果

Table 2 Analytical data of oxygen and carbon stable isotopes from dolostones from Buqu Formation

样品编号	岩性	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰PDB}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰PDB}$
zp03-1	中-粗晶白云岩	-0.01	-9.97
zp03-2	中-粗晶白云岩	1.71	-11.17
zp03-3	粗晶白云岩	3.43	-7.68
zp03-4	粗晶白云岩	1.6	-8.23

岩期、后生期甚至表生期交代充填形成的产物。在这里,最有意义是最高温度点,它指示地层经历的最大古地温和最大埋藏深度。布曲组白云岩与同层位石灰岩温度的差异,在剖面上均可观察到白云岩与石灰岩互层产出的特点,加上白云石形成温度远大于石灰岩中方解石受热温度,这类高温异常分

布是热液矿床最典型的特征。在热液矿床剖面上,热液成因矿体温度高,矿床顶底板温度低,矿体及蚀变带以及围岩之间温度可以是渐变的,也有突变的,但矿体温度大于围岩温度是热液矿床最明显的特征。因此,可以认为这一地区白云岩成因可与一般热液矿床类比,它的交代作用可能与热流体的侧向运移和流动有关。

白云岩碳、氧同位素及其组成的特征是研究其成因机制的非常重要的地化指标,白云石中的碳、氧同位素的组成受白云石化对象的碳、氧同位素的组成及成岩流体的盐度、温度等控制。白云石中的氧同位素一般受流体-白云石之间平衡交换反应的影响,因此白云石化流体中的温度与氧同位素是白云石氧同位素分布的决定性因素(赵俊兴等,2005;

李凤杰等,2016)。本文以包裹体测温为流体温度变化区间,通过Land(1983)的氧同位素分馏公式,估算出成岩过程中流体的氧同位素值。Land的流体氧同位素分馏方程为:

$$1000\ln\alpha_{\text{dolomite-water}}=3.2\times 10^6/T^2-3.3$$

方程中 α 为分馏系数, T 为包裹体温度的开氏温度(K)值,白云石与水溶液的计量单位均为SMOW,氧同位素的SMOW值与PDB值之间的关系可以根据Coplen(1983)的公式进行换算。

Coplen公式如下:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}=1.03091\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}+30.19$$

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}=0.97002\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}-29.98$$

根据分馏方程建立的白云石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 与温度 T ($^{\circ}\text{C}$)以及流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值变化关系的理论曲线(图5),计算出流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值介于4.82‰~12.85‰,与岩浆热液 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值(6.00‰~10.00‰)分布区间较为一致(Taylor, 1997),远大于侏罗纪时期全球古海水-1.00‰~1.00‰的值(Shackleton, 1976),加之岩浆热液的温度远大于包裹体测温的温度,说明白云化流体可能不是直接源自岩浆热液。而四川盆地南江栖霞组白云岩中的鞍形白云石成岩流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}=7\text{‰}\sim 14\text{‰}$ (李小宁等,2016),与本文计算的流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值范围基本一致,其白云石为封闭环境下地下高温卤水交代灰岩而成。而根据前文包裹体测得的盐度数据,白云石流体为高盐度流体,很可能也是地下卤水。加之南羌塘坳陷布曲组白云岩同样形成于封闭的流体系统(张帅等,2016),因

此可以认为研究区白云岩的成因与南江栖霞组白云岩有一定的相似性。

羌塘盆地内布曲组地层最大古埋深深度为3013~4219 m(王成善等,2001)。王成善等(2001),通过羌塘盆地烃源岩埋藏史恢复和古地温测算的结果,认为羌塘盆地的古地温梯度为2.54~2.82 $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,为了测算布曲组地层在最大埋深时的最高古地温,因此采用2.82 $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 的古地温梯度值。假设地表温度为20 $^{\circ}\text{C}$,最大埋深时白云石的成岩温度应不超过104.97~138.98 $^{\circ}\text{C}$ 。而所测得的所有白云石包裹体温度数据以及少量方解石包裹体温度大于该值,说明形成白云石的流体不可能是地下高浓度盐水在正常的地温梯度下受热形成,而有可能是地下岩浆活动对地下盐水的加热作用下形成的。而根据前人的研究(万友利等,2017),研究区布曲组地层的下伏地层为莎巧木组地层,莎巧木组发育灰黑色钙质泥岩,可能为潟湖环境沉积。而布曲组沉积早期,研究区为局限的沉积环境,形成布曲组晶粒白云岩的白云化流体很可能就是封存于地层之中的局限环境下产生的高浓度的蒸发海水。

因此认为研究区白云石可能是地下岩浆作用使地层中封存的高浓度蒸发海水加热,高温高盐度流体在相对封闭的环境中交代了寄主灰岩形成的,并在孔隙中充填了鞍形白云石。由于白云化作用发生在相对封闭的环境中,卤水中镁离子的消耗导致流体对方解石过饱和,白云石沉淀的动力学屏障重新建立,之后又形成了高温方解石(李小宁等,2016),这也同样解释了研究区存在高温方解石包裹体的原因。

8 结 论

(1)南羌塘坳陷扎仁地区白云岩类型为晶粒白云岩与介壳白云岩,白云岩多具雾心亮边结构,在孔隙发育部位还可见较多的鞍形白云石。

(2)白云石流体包裹体温度为150.2~216.0 $^{\circ}\text{C}$,为高温成因的白云石,白云石碳氧同位素值说明白云化流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值介于4.82‰~12.85‰,结合流体包裹体盐度数据,说明形成羌塘盆地晶粒白云岩的白云化流体为高温高盐度流体。

(3)扎仁地区白云石可能是在相对封闭环境下,封存于地下的高盐度海水在岩浆作用下温度升

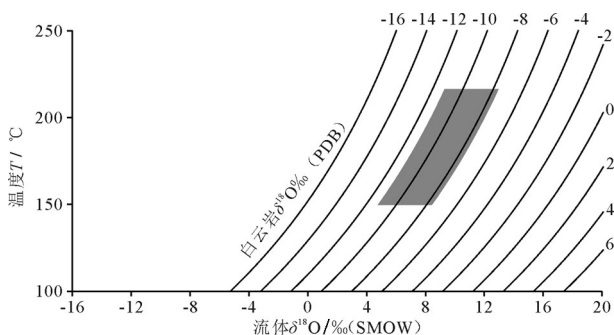


图5 根据Land分馏方程计算的温度与白云石矿物以及流体 $\delta^{18}\text{O}$ 关系图

Fig.5 Plots of equilibrium relationship between $\delta^{18}\text{O}$ fluid and temperature for various $\delta^{18}\text{O}$ dolomite from Land's fractionation equation

高交代灰岩形成, 卤水中镁离子的消耗导致流体对方解石过饱和继而形成了高温方解石。

References

- Coplen T B, Kendall C, Hopple J. 1983. Comparison of stable isotope reference samples[J]. *Nature*, 302(5905): 236–238.
- Chen Wenbin, Yang Ping, Zhang Yujie, Peng Zhiming. 2006. Dolostone reservoirs and their genesis in the Zaring oil pool in southern Qiangtang Basin[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26(2): 42–46 (in Chinese with English abstract).
- Deng Yan, Huang Dong, Mi Hong, Jin Tao, Yan Weipeng. 2017. Research on the origin of lacustrine dolomitic reservoir in Jurassic Da'an'zhai Formation of Sichuan Basin[J]. *Geology in China*, (1): 76–85 (in Chinese with English abstract).
- Ji Changjun, Yi Haisheng, Xia Guoqing, Xie Tuo, Yin qing, Li Qilai. 2016. Characteristics and exploration significance of oil reservoir in Qiangtang Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 35(1): 74–79 (in Chinese with English abstract).
- Land L S. 1983. The application of stable isotopes to studies of the origin of dolomite and to problems of diagenesis of clastic sediments[J]. *Short Course Notes*, (4): 1–22.
- Liu Jianqing, Jia Baojiang, Yang Ping, Cheng Yulu, Peng Bo, Li Zhengjiang. 2007. The application of carbon, oxygen and strontium isotopes to the study of Middle–Upper Jurassic sequence stratigraphy in Longweicuo area, Qiangtang Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 28(3): 253–260 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jiaduo, Zhou Wen, Li Yong, Qiu Dongzhou. 2007. Analysis and Evaluation of Oil and Gas Resources' Latent Capacity in Qingzang area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 253–274 (in Chinese).
- Liu Jianqing, Chen Wenbin, Yang Ping, Chen Wenxi, Fu Xiugeng. 2008. The Longeni–Angdanrco paleo–oil dolomite geochemical characteristics in southern part of the central uplift zone of Qiangtang Basin and its significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1379–1389.
- Liu Jianqing, Jia Baojiang, Yang Ping, Chen Wenxi, Fu Xiugeng. 2008. 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*, 26(1): 28–38 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianqing, Yang Ping, Chen Wenbin, Chen Wenxi, Fu Xiugeng. 2010. The characteristics of Longeni–Angdanrco paleo–oil dolomite in southern part of the central uplift zone of Qiangtang Basin and its forming mechanism[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(1): 311–321 (in Chinese with English abstract).
- Lei Hejin, Li Guorong, Gao Yuwei, Zhou Jiling, Feng Yingying. 2016. Geochemical characteristics and generation mechanism of cambrian dolomite in the south of Sichuan Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 31(3): 39–47 (in Chinese with English abstract).
- Li Fengjie, Du Lingchun, Zhao Junxing, Li Yuegang, Xiang Fang, Li Fuping. 2016. Dolomite genesis in Member Ma55 of Majiagou Formation, Sudong area, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 37(3): 328–338 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaoning, Huang Sijing, Huang Shuguang, Huang Keke, Yuan Tao, Luo Wen. 2016. Petrologic and geochemical characteristics and the origin of dolomites in the Qixia Formation in Nanjiang county of the Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & experiment*, 38(2): 251–258 (in Chinese with English abstract).
- Meng Sen, Zhou Jingao, Yangliu, Hao Yi, Lou Xue. 2017. Genesis of medium–coarse crystalline dolomite of middle Permian Qixia Formation, Western Sichuan[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 22(1): 75–83 (in Chinese with English abstract).
- Shackleton N J. 1976. Paleotemperature history of the Cenozoic and the initiation of Antarctic glaciation: Oxygen and carbon isotope analyses in DSDP sites[J]. *Ligament Balancing*, 277, 279, and 281.
- Taylor H P J. 1997. Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits[J]. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 229–302.
- Tan Fuwen, Wang Jian, Wang Xiaolong, Du Bowei. 2004. 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*, 25(2): 119–126 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chengshan, Yi Haisheng. 2001. *Geologic Evolution and Hydrocarbon Assessment of Qiangtang Basin in Xizang*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 183–223 (in Chinese).
- Wang Jian, Ding Jun, Wang Chengshan, Tan Fuwen. 2009. Investigation and Evaluation of Strategic Constituents of Oil and Gas Resources in Qinghai–Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 19–25 (in Chinese).
- Wang Jian, Fu Xiugen. 2018. Sedimentary evolution of the Qiangtang Basin[J]. *Geology in China*, 45(2): 237–259 (in Chinese with English abstract).
- Wan Youli, Wang Jian, Tan Fuwen, Fu Xiugeng, Wang Zhongwei. 2017. Dolomite reservoir formation mechanism and evolution feature of the Buqu formation in the Long'eni–Angdaerco area, Qiangtang basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 41(3): 21–33 (in Chinese with English abstract).
- Xia Guoqing, Yi Haisheng, Li Gaojie, Jin Feng, Ji Changjun, Li Qilai. 2017. Characteristics and evolution of oil reservoir zones of Buqu Formation in the southern Qiangtang Depression[J]. *Lithologic Reservoirs*, 29(1): 90–96 (in Chinese with English abstract).
- Yi Haisheng, Gao Chunwen, Zhang Xiaoqing, Lin Jinhui. 2004. 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)*, 31(6): 611–615 (in Chinese with English abstract).
- Yi Haisheng, Chen Zhiyong, Ji Changjun, Yang Xiaoping, Xia Guoqing. 2014. New evidence for deep burial origin of sucrosic

- dolomites from Middle Jurassic Buqu Formation in southern Qiangtang Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(3): 737–746(in Chinese with English abstract).
- Zhang Juntao, Hu Wenxuan, Wang Xiaolin, Qian Yixiaong, Wu Shixiang. 2011. Character and origin of Cambrian hydrothermal dolomite conglomeration in the northwestern margin of Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 234–245(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuai, Xia Guoqing, Yi Haisheng, Cai Zhanhu, Li Qilai. 2016. Origin of saddle dolomites from the Buqu Formation of Longeni area in southern Qiangtang Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 37(4): 483–489(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaoqing, Yi Haisheng, Zhu Yingtang. 2005. Study on reservoir characteristics of the dolomite in the Shuanghu area, Qiangtang Basin[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 27(5): 10–13 (in Chinese).
- Zhao Junxing, Chen Hongde, Zhang Jinquan, Liu XiaoLi. 2005. Genesis of dolomite in the fifth member of Majiagou Formation in the middle Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 38–41(in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenjin, Zhao Xun, Jiang Zhongti, Xiong Jiayu. 2006. Deep structure and petroleum prospect evaluation of the Qiangtang basin, Tibet[J]. *Geology in China*, 33(1): 1–13(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhengzhang, Li Yongtie, Ye Hefei, Zhang Yuwen. 2000. Oil and Gas Generation in the Marine Source Layer of the Qinghai–Tibet Plateau[M]. Beijing: Science Press, 601–610(in Chinese).
- Zhu Jingquan, Li Yongtie. 2000. Types, origin and reservoir characteristics of the Jurassic dolostones in the Qiangtang Basin, North Tibet[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2(4): 30–42(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈文彬, 杨平, 张予杰, 彭智敏. 2006. 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*, 26(2): 42–46.
- 邓燕, 黄东, 米鸿, 金涛, 闫伟鹏. 2017. 四川盆地侏罗系大安寨段湖相含云质储层成因研究[J]. *中国地质*, (1): 76–85.
- 季长军, 伊海生, 夏国清, 谢拓, 尹青, 李启来. 2016. 羌塘盆地油藏带特征及勘探意义[J]. *地质科技情报*, (1): 74–79.
- 刘建清, 贾保江, 杨平, 陈玉禄, 彭波, 李振江. 2007. 碳、氧、锶同位素在羌塘盆地龙尾错地区层序地层研究中的应用[J]. *地球学报*, 28(3): 253–260.
- 刘家铎, 周文, 李勇, 丘东洲. 2007. 青藏地区油气资源潜力分析与评价[M]. 北京: 地质出版社, 253–274.
- 刘建清, 陈文斌, 杨平, 陈文西, 付休根. 2008. 羌塘盆地中央隆起带南侧隆额尼—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*, 24(6): 1379–1389.
- 刘建清, 贾保江, 杨平, 陈文彬, 陈文西, 付修根. 2008. 羌塘盆地中央隆起带南侧隆额尼—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*, 26(1): 28–38.
- 刘建清, 杨平, 陈文彬, 陈文西, 付休根. 2010. 羌塘盆地中央隆起带南侧隆额尼—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*, 17(1): 311–321.
- 雷和金, 李国蓉, 高鱼伟, 周吉羚, 冯莹莹, 符浩. 2016. 四川盆地南部寒武系白云石地球化学特征与形成机制[J]. *海相油气地质*, 21(3): 39–47.
- 李凤杰, 杜凌春, 赵俊兴, 李跃刚, 向芳, 李浮萍. 2016. 鄂尔多斯盆地苏东地区马家沟组五段5亚段白云岩成因[J]. *石油学报*, 37(3): 328–338.
- 黄思静, 黄树光, 黄可可, 袁桃, 罗文, 李小宁. 2016. 四川盆地南江栖霞组白云岩岩石学、地球化学特征及成因[J]. *石油实验地质*, 38(2): 251–258.
- 孟森, 周进高, 杨柳, 郝毅, 娄雪. 2017. 川西地区中二叠统栖霞组中一粗晶白云岩成因[J]. *海相油气地质*, 22(1): 75–83.
- 谭富文, 王剑, 王小龙, 杜佰伟. 2004. 羌塘盆地雁石坪地区中一晚侏罗世碳、氧同位素特征与沉积环境分析[J]. *地球学报*, 25(2): 119–126.
- 王成善, 伊海生. 2001. 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, 183–223.
- 王剑, 丁俊, 王成善, 谭富文. 2009. 青藏高原油气资源战略选区调查与评价[M]. 北京: 地质出版社, 19–25.
- 王剑, 付修根. 2018. 论羌塘盆地的演化[J]. *中国地质*, 45(2): 237–259.
- 万友利, 王剑, 谭富文, 付修根, 王忠伟. 2017. 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*, 41(3): 21–33.
- 夏国清, 伊海生, 李高杰, 金峰, 季长军, 李启来. 2017. 南羌塘坳陷布曲组油藏带特征及空间演化规律[J]. *岩性油气藏*, 29(1): 90–96.
- 伊海生, 高春文, 张小青, 林金辉. 2004. 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*, 31(6): 611–615.
- 伊海生, 陈志勇, 季长军, 杨晓萍, 夏国清, 吴驰华. 2014. 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*, 30(3): 737–746.
- 张军涛, 胡文瑄, 王小林, 钱一雄, 吴世祥. 2011. 塔里木盆地西北缘寒武系中热水白云石团块特征及成因研究[J]. *地质学报*, 85(2): 234–245.
- 张帅, 夏国清, 伊海生, 蔡占虎, 李启来. 2016. 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*, 37(4): 483–489.
- 张小青, 伊海生, 朱迎堂. 2005. 羌塘盆地双湖地区白云岩储集层特征研究[J]. *西南石油学院学报*, 27(5): 10–13.
- 赵俊兴, 陈洪德, 张锦泉, 刘小丽, 付锁堂. 2005. 鄂尔多斯盆地中部马五段白云岩成因机理研究[J]. *石油学报*, 26(5): 38–41.
- 赵文津, 赵逊, 蒋忠惕, 熊嘉育. 2006. 西藏羌塘盆地的深部结构特征与含油气远景评价[J]. *中国地质*, 33(1): 1–13.
- 赵政璋, 李永铁, 叶和飞, 张昱文. 2000. 青藏高原海相烃源层的油气生成[M]. 北京: 科学出版社, 601–610.
- 朱井泉, 李永铁. 2000. 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*, 2(4): 30–42.