

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.11001

羌塘盆地中侏罗统布曲组白云岩有序度与 晶胞参数的影响因素及地质意义

万友利^{1,2}, 赵 瞻^{1,2*}, 胡志中², 李学仁^{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, 四川 成都 610081)

摘要:研究羌塘盆地中侏罗统布曲组白云岩有序度和晶胞参数的特征、影响因素及地质意义。在前期对白云岩详细分类的基础上,通过X射线粉晶衍射方法进行测试,用jade 6.5软件对测试结果进行处理,获取白云石的最大晶面间距、有序度、晶胞参数等信息,探讨其影响因素及地质意义,结果表明:(1)北羌塘坳陷西南缘喷呐湖地区颗粒白云岩具低—中等的有序度,晶胞参数较为集中,可能是蒸发潟湖环境中发育的颗粒灰岩为高镁方解石,在经历埋藏过程的调整白云石化作用而成;(2)南羌塘坳陷古油藏带布曲组白云岩中,微—粉晶白云岩有序度、晶胞参数分布范围大,为灰岩在准同生阶段快速交代、在埋藏阶段重结晶形成;细晶白云岩有序度较高,晶胞参数呈正相关,发育在稳定的埋藏环境中,白云石晶体在继承先驱灰岩孔隙中自由生长而成;中—粗晶白云岩有序度最高,是在中—深埋藏阶段,经历了足够长久的白云石化作用过程,有限的空间限制了晶体的自由生长;微—粉晶白云岩→细晶白云岩→中—粗晶白云岩的有序度逐渐增高,表明稳定的埋藏过程有利于白云石向有序转化;(3)布曲组白云岩晶胞参数 a 、 c 以不同程度向理想白云石左下方偏移,说明布曲组白云岩形成以后经历了强烈的构造挤压,估算压力可达1000MPa,与晚白垩世的构造运动有关,指示南羌塘坳陷布曲组白云岩古油藏是由逆冲推覆运动造成的。

关键词:羌塘盆地;布曲组;白云石化作用;白云石有序度;晶胞参数

中图分类号:P618.13

文献标识码:A

0 引言

“白云石/岩问题”(Dolomite problem)一直是地质学中悬而未决的难题之一(Machel, 2004),自1791年法国地质学家Deodat Dolomieu在意大利北部的多洛米蒂山发现并命名白云岩后(Mckenzie and Vasconcelos, 2009),两个多世纪中,白云岩作为油气储层和层控贱金属矿床的宿主矿物得到石油地质勘探家和矿床学家的广泛研究,各种关于白云岩成因的学说(模式)风起云涌。这些学说(模式)都是基于露头、岩心观察和薄片鉴定,结合对样品的各种地球化学测试,反演白云石形成时的流体性

质,恢复其形成时的环境,再套用已有的白云石成因模式或分段套用已有的白云石成因模式(Machel, 1986),其核心内容均为富镁流体和富钙碳酸盐岩相互作用并发生交代(Warren, 2000; 王茂林等, 2013)。然而地球化学分析结果具有多解性,如不同环境中沉淀的白云石可能具有相似的地球化学特征,或者不同的学者也可能对同一组地球化学分析结果作出不同的解释;同时,白云石矿物晶体的沉淀过程和形成后经历的成岩改造复杂,仅用一种单一的模式解释过于简单,且地球化学分析所得数据也往往是多期次成岩作用后的综合表现,不能够准确地表征单期白云石形成的过程。白云石晶体

收稿日期:2021-08-11; 改回日期:2021-10-26

作者简介:万友利(1984—),男,博士后,高级工程师,主要从事储层地质与储层地球化学研究工作。E-mail: wanyouli@cdut.edu.cn

通讯作者:赵瞻(1982—),男,硕士,高级工程师,主要从事含油气盆地分析和页岩气地质调查工作。E-mail: zhaozhan1982@163.com

资助项目:国家自然科学基金青年基金项目(No. 41902138)资助

结构中保存了其形成过程中的环境、结晶、晶体生长、流体等方面特有的证据,或可作为研究白云石形成环境、形成机理的手段(张杰等, 2014c)。

已有的研究成果表明,白云石的有序度、晶面间距和晶胞参数与白云石的形成环境、条件密切相关。诸多学者在研究白云石成因时都不同程度地涉及到有序度和晶面间距(钟倩倩等, 2009; 郑剑锋等, 2013, 2014)。对于晶胞参数,刘集银和王自友(1988)报道了理想白云石和方解石的晶胞参数; Rosen et al. (1989)探讨了澳大利亚南部 Coorong 地区两种白云岩晶胞参数的差异的原因; 雷怀彦和朱连芳(1992)用晶胞参数的差异判断四川盆地震旦系灯影组白云岩的成岩环境; Reeder and Markgraf (1986)、Ross and Reeder(1992)分别通过模拟实验研究了高温、高压条件下白云石晶胞参数的变化; 张杰等(2014a, b, c)结合白云石组构特征讨论其有序度、晶胞参数的差异,提出白云石晶体结构特征对白云石成因和储层研究的意义; 王泽宇等(2020)将有序度和晶胞参数用于研究塔里木盆地蓬莱坝组白云岩成因时,获得良好的效果,也进一步表明白云石晶体结构特征可作为研究白云石成因研究的行之有效的工具。

羌塘中生代海相沉积盆地是我国目前勘探程度最低的含油气盆地,在其南部坳陷古油藏带发育的布曲组砂糖状含油白云岩是主要的储集体(Zhao, 2000)。朱井泉和李永铁(2000)最先依据南羌塘坳陷布曲组白云岩与蒸发岩类的伴生情况将其总结为与膏岩有关的高盐度、蒸发条件成因和与膏岩无关的混合水成因两种类型,王兴涛等(2000)、张立强等(2001)对其进一步解释为与强蒸发有关的毛细管浓缩作用模式、回流渗透模式,和非蒸发环境的混合水模式,其后诸多学者认为隆鄂尼地区的白云岩为混合水成因(伊海生等, 2004; 张小青等, 2005; 陈文彬等, 2006; 刘建清等, 2008a, b, c, 2010)。近年来,随着研究程度的深入和微区测试技术的进步,伊海生等(2014)、李鑫等(2018)提出古油藏带白云岩为高温埋藏成因,万友利等(2017, 2018a)则认为研究区白云岩为多期次白云石化作用叠加的结果,季长军等(2020)认为该区砂糖状白云岩为热液交代成因,孙伟等(2020)提出该区晶粒白云岩为埋藏环境中封闭条件下的白云石化作用形成。他们都是通过白云岩矿物结构进行白云岩成因和演化过程探讨,但取得的认识却

存在较大的分歧。鉴于此,笔者拟从岩石学本身出发,在前期岩石学详细分类的基础上(万友利等, 2018a),进一步开展有序度、晶面间距和晶胞参数分析,讨论布曲组白云岩有序度的控制因素、晶胞参数变化及指示意义、白云岩成因与成形过程,以期为后期研究提供新的思路。

1 地质背景

羌塘盆地位于青藏高原腹地,是一个在前奥陶系结晶基底上发育起来的大型中生代海相沉积盆地(谭富文等, 2016),原型盆地内构造格局多隆多坳、相间分布,整体分为边缘断隆、隆起构造、坳陷构造三大类构造单元(万友利等, 2018a),自北界可可西里-金沙江缝合带向南,可将盆地分为北缘褶皱冲断带、北部坳陷带、中央隆起带(含隐伏隆起区)及南部坳陷带4个一级构造单元,盆地主体呈“两坳夹一隆”的构造格局。研究区位于南部坳陷带,部分样品采自于中央隆起带北缘喷呐湖剖面(图1)。

羌塘中生代沉积盆地的构造演化经历了“前陆盆地阶段→初始裂谷阶段→被动陆缘裂陷阶段→被动陆缘坳陷阶段→被动大陆向活动大陆转换阶段→盆地萎缩消亡阶段”6个阶段(王剑等, 2020)。晚三叠世晚期(那底岗日期)的岩浆柱使羌塘前陆盆地南侧的班公湖-怒江一带地壳破裂、发生裂谷作用,快速扩张成早侏罗世班公湖-怒江洋盆,羌塘南部地区发展成被动大陆边缘盆地;至中侏罗世巴柔期(曲色-色哇期),伴着班公湖-怒江洋盆的进一步扩张,羌塘中-北部剥蚀区沉降成河流-湖泊环境而接受沉积,在南部主裂陷带快速沉降成大陆边缘盆地,并以狭窄的水道与北部河流-湖泊环境水体相通,此时羌塘内部整体呈“地堑-地垒”结构;至中侏罗世巴通期(布曲期),羌塘进入持续均匀沉降阶段,南侧班公湖-怒江洋盆的海水大规模向北海侵、越过中央隆起区,将南北羌塘连接成统一的被动大陆边缘坳陷盆地,使得大部分陆缘区被海水淹没(王剑等, 2020; 孙伟等, 2020),陆源碎屑供给急剧降低,从而发育了布曲组巨厚层的碳酸盐岩。

2 实验方法及样品制备

2.1 实验原理及方法

理想白云石的晶体结构中阳离子占位是完全有

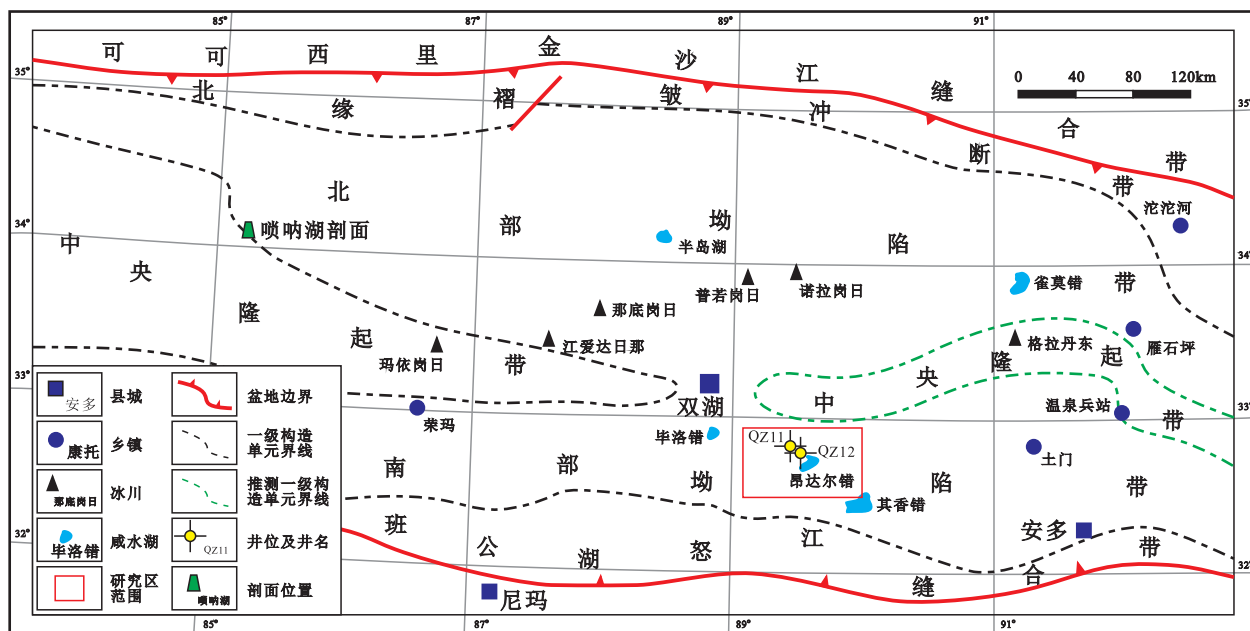


图1 研究区钻井和剖面位置(据万友利等,2018a 修改)

Fig. 1 Location of studied outcrops and wells (modified from Wan Youli, et al., 2018a)

序的,即沿结晶学 c 轴(00i)方向 Ca^{2+} 层和 Mg^{2+} 层交替排列,并被 CO_3^{2-} 层分隔开,在 X 射线衍射图上会出现超结构线。但自然界中不存在理想的白云石,大多数天然产出的白云石都不符合理想的化学配比和理想的结构,即作为自然界沉积(淀)记录的白云石矿物都呈过渡相,具有一定程度的无序现象,且 Ca^{2+} 的摩尔分数介于 48% ~ 62% 之间。Goldsmith et al. (1961) 首先用 X 射线粉晶衍射方法研究白云石晶体的有序—无序现象,发现随着白云石晶体结构中阳离子分配无序程度增加,超结构线的强度逐渐减弱,从而提出可用超结构线强度减弱的情况表征白云石晶体的有序无序程度 (Goldsmith and Graf, 1958)。当白云石晶体中阳离子占位完全有序(半径较大的 Ca^{2+} 占据 A 位、半径较小的 Mg^{2+} 占据 B 位),超结构反射峰(015)强度与(110)反射峰强度相同,若 c 轴方向 Ca^{2+} 层和 Mg^{2+} 层完全无规则排列时,超反射结构消失,(015)反射峰的强度为 0,因此可用(015)强度与(110)强度的比值“ I_{015}/I_{110} ”表征白云石的有序度 (Fuchtbauer, 1974)。 $I(hkl)$ 一般按对应面网反射的强度计算,用软件 jade 6.5 处理 X 射线衍射结果时,可采用峰高、峰面积、拟合峰高、拟合峰面积中的 1 种作为面网反射的强度进行计算,其中:峰面积 = $FWH \times \text{峰高}(H)$ 。

白云石晶体结构中,由于 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的半径不同,离子半径的差异导致晶面间距和晶胞参数

的系统变化,而晶面间距和晶胞参数也可以通过 X 射线粉晶衍射的方法进行测定,即当白云石中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的含量发生变化时,其结果反映在 X 射线衍射图上表现为(104)面网反射峰的位置发生移动。Goldsmith et al. (1955, 1958) 先后建立了方解石中 d_{104} 与 MgCO_3 含量、白云石中 d_{104} 与 CaCO_3 含量的相关关系。Lummsden 等从岩石化学的角度推导出计算白云石中 CaCO_3 摩尔分数的表达式为 $N_{\text{Ca}} = 333.33d_{104} - 911.11$,式中 N_{Ca} 为白云石中 CaCO_3 层的摩尔分数(mol%), d_{104} 为白云石最强衍射峰晶面间距(Å) (钟倩倩等, 2009)。

2.2 样品制备与测试

本次研究涉及的样品取自南羌塘坳陷古油藏带昂达尔错地区 QZ12 井岩心、北羌塘坳陷西部南缘喷呐湖地区布曲组剖面。样品处理时,挑选较纯的白云岩,通过样品观察和薄片鉴定区分不同类型白云石组构,根据井下薄片观察的结果,在对应样品副样上用牙钻(精确到 0.1mm)获取不同结构的白云石样品,共采集样品 31 件,每件样品不少于 5g,用玛瑙研钵磨细至 200 目用于 X 衍射分析,每次研磨新的样品前,将玛瑙研钵用 99.99% 的无水酒精清洗,以排除污染。采用压片法制备测试样品,压片时用粗糙的报纸垫在底部,以减少因压片产生的择优取向。

样品分析在中国地质调查局成都地质调查中

心“自然资源部西南矿产资源监督检测中心”X'Pert Pro MPD(荷兰 帕纳科)X 射线粉晶衍射仪上完成,使用 Cu $k\alpha$,在次级衍射光路加装单色器,光管的阳极靶电压、电流分别为 40kV、40mA,测量的 2θ 角范围选取为 $20^\circ \sim 40^\circ$,采用连续扫描方式进行(曾理等, 2004);测量的控制和数据采集、衍射图显示采用设备自带软件完成;采集的数据以 ASC II 码格式导出,在个人计算机(Thinkpad T440S)上采用 jade 6.5 和 Origin 2019b 软件完成数据处理、数据和衍射图打印。数据处理具体流程为“数据导入→寻峰→物相检索→扣除背底→平滑、拟合→含量计算→晶胞精修”。

3 白云石类型

羌塘盆地布曲组碳酸盐岩包括灰岩和白云岩两大类,依据前期研究成果(万友利等, 2018a),将白云岩分为保留先驱原始组构的白云岩、不具有原始组构的晶粒白云岩和白云石充填物,本次研究仅对基质白云石开展工作,不对白云石充填物进行讨论。

古油藏带布曲组发育的保留先驱灰岩原始组构的白云岩包括(残余)颗粒白云岩、微—粉晶白云岩(图 2A、B、C),其中(残余)颗粒白云岩可进一步分作两类:一类是以拟态(晶)交代方式发育的白云

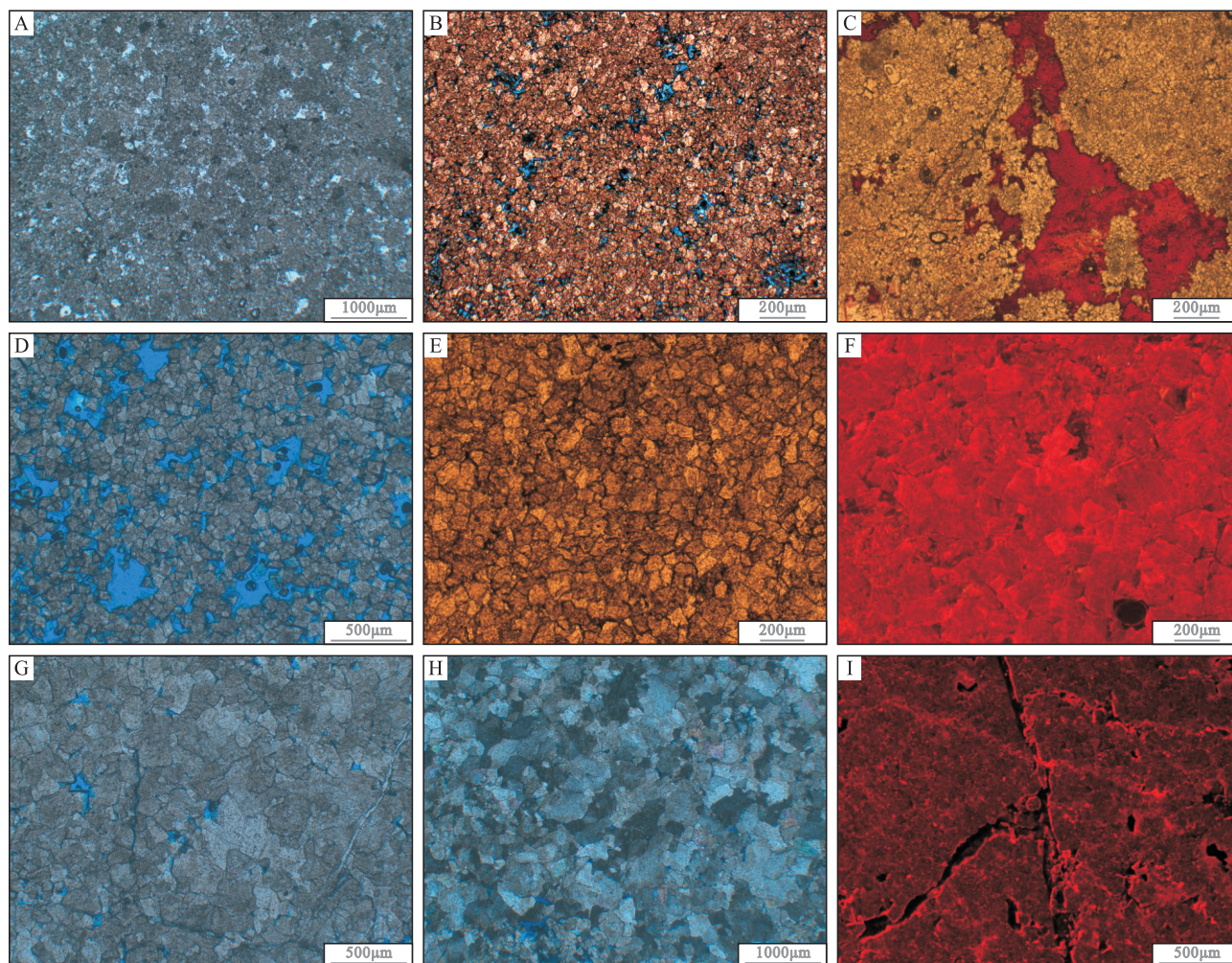


图 2 羌塘盆地布曲组白云岩显微镜下及阴极发光特征

A 颗粒白云岩,溶孔发育, NF20S-02, 单偏光; B 粉晶白云岩,蓝色铸体, QZ12-64.95m, 单偏光; C 微晶白云岩,红色为茜素红染色, QZ12-190.51m, 单偏光; D 细晶、自形白云岩,孔隙发育,蓝色为铸体, QZ12-196.03m, 单偏光; E 细晶、半自形白云岩,孔隙不发育, QZ12-26.75m, 单偏光; F 细晶、半自形白云岩,阴极发光呈较明亮的橘红色, QZ12-71.49m; G 中—粗晶白云岩,白云石晶粒呈镶嵌接触,可见晶间孔,蓝色为铸体, QZ12-102.02m, 单偏光; H 粗晶白云岩,晶粒呈镶嵌接触, QZ12-106.92m, 正交偏光; I 粗晶白云岩,阴极发光呈暗色光,局部发育微裂隙,未充填, QZ12-20.68m。

Fig. 2 Microscope photographs showing cathodoluminescence characteristics of dolomites of Buqu Formation in Qiangtang Basin

石,能够完整保存颗粒轮廓及内部结构;另一类是只保留了原始颗粒的轮廓,但其内部结构已无法识别的白云岩,本次研究将其归为晶粒白云岩范畴。喷呐湖地区布曲组剖面出露情况极差,仅见白云岩零星出露,与石膏伴生,采集到的9件样品,均为颗粒白云岩,可见完整的颗粒轮廓及内部结构(图2A),本次研究中用其代表拟态交代的白云石,可用于代表前人分类中高盐度、强蒸发成因的白云石(朱井泉和李永铁,2000;王兴涛等,2000;张立强等,2001),并用作与无蒸发岩伴生的白云石的对比。布曲组发育的不具原始组构的晶粒白云岩,其晶粒大小不一、自形程度相差较大,前期研究时将其进一步分为细晶自形白云岩、细晶半自形白云岩、中—粗晶它形白云岩(万友利等,2018a,b)。细晶自形白云岩在显微镜下以细晶(0.05~0.25mm)为主,少量粉晶,白云石晶体具平直的晶面边界,自形程度很高,晶体之间相互支撑呈网格状,晶间孔发育(图2D);细晶半自形白云岩在显微镜下以细晶(0.05~0.25mm)为主,白云石晶体仍具有平直的晶面边界,但自形程度较细晶自形白云岩有所降低,晶体紧密堆积,晶间孔不发育(图2E),阴极发光下,细晶半自形白云岩的发光性与细晶自形白云岩相当,以较明亮的橘红色为主,晶体边缘发光性略有增强(图2F),本次研究依据白云石“晶体边界平直程度+晶粒大小”,将细晶自形白云石和细晶半自形白云岩一起划入细晶白云岩中。中—粗晶它形白云岩主要由晶体自形程度较差的它形白云石组成,晶粒以中—粗晶(0.25~2.00mm)为主,该类白云石在古油藏带有2种产出方式:一种是不彻底或者选择性白云石化的产物,属于灰岩和白云岩之间的过渡类型,该类型白云岩发育在中—深埋藏阶段,由于白云石化流体中的 Mg^{2+} 供给不足造成的不彻底白云石化(万友利等,2018a);另一种以灰色或深灰色、中厚层状产出的纯白云岩,该类白云岩在镜下呈细晶—粗晶均有发育,但以中—粗晶为主,部分样品的白云石晶粒大小具有双众数分布特征,预示着重结晶作用的影响。中—粗晶白云石自形程度差,多以曲面、它形晶为主,与具有平直晶面的细晶半自形白云石的最显著区别为中—粗晶白云石之间具有弯曲的晶面边界,晶粒呈镶嵌接触甚至缝合线接触(图2G、H),阴极发光下呈暗红色甚至不发光(图2I)。

4 实验结果

研究区白云岩矿物成分定量分析结果、晶胞参数、 $CaCO_3$ 摩尔分数与有序度计算结果如表1所示,研究区布曲组白云岩样品中矿物成分仅包括方解石和白云石(图3A、B),未受到陆源碎屑物质的影响,这与前期通过元素地球化学中K-Na评价结果一致(万友利等,2018b)。喷呐湖剖面布曲组颗粒白云岩中,仅有个别样品中含有极少量的方解石矿物,该类有序度介于0.58~0.69之间, $CaCO_3$ 摩尔分数为48.79%~50.98%,晶胞参数a分布在4.7975~4.8804Å之间,晶胞参数c分布在15.9663~15.9930Å之间;粉晶白云岩含有一定量的方解石矿物,有序度为0.48~0.62, $CaCO_3$ 摩尔分数为51.02%~52.93%,晶胞参数a分布在4.7992~4.8083Å之间,c分布在15.9676~16.0134Å之间;细晶白云岩含有少量的方解石矿物,有序度为0.69~1, $CaCO_3$ 摩尔分数为48.38%~51.52%,a分布在4.7966~4.8063Å之间,c为15.9658~15.9999Å之间;中—粗晶白云岩含有少量的方解石矿物,有序度为0.67~1, $CaCO_3$ 摩尔分数为49.76%~51.49%,a在4.7919~4.8095Å之间,c在15.9437~16.0160Å之间。

5 讨论

5.1 有序度分析及控制因素

喷呐湖剖面颗粒白云岩的有序度分布范围非常集中(图3C、D),平均为0.65,略高于羌资12井微—粉晶白云岩均值,但低于细晶白云岩和中—粗晶白云岩。对羌资12井的样品来说,微—粉晶白云岩有序度最低,最低值为0.48,均值也仅0.57,细晶白云岩和中—粗晶白云岩有序度分布范围相当(图3C),中—粗晶白云岩有序度平均值比细晶白云岩有序度均值稍高,单独考察有序度仅为0.67的中—粗晶白云岩样品QZ12-009,显微镜下该样品为多颗粒粉晶白云石被新的白云石胶结形成的粗晶白云石集合体,局部仍保留着粉晶白云石的痕迹,这说明样品QZ12-009的有序度表征的是多期白云石晶体的综合表现,已不具有代表性。在排除样品QZ12-009后,中—粗晶白云岩的有序度平均值为0.87。

有序度是白云石晶体形成、生长过程中温度、压力、流体性质等共同作用的结果,与有序度有关的

表 1 羌塘盆地布曲组白云岩 XRD 衍射数据及计算结果

Table 1 XRD data and calculation results of dolomites of Buqu Formation in Qiangtang Basin

样品编号	岩性	$D_{104}/\text{\AA}$	有序度	摩尔分数 $\text{mol}/\%$		矿物含量 $w/\%$		晶胞参数/ $\text{\AA}$	
				CaCO_3	MgCO_3	方解石	白云石	a	c
NF20S-01	颗粒白云岩	2.88631	0.69	50.98	49.02	/	100	4.7975	15.9663
NF20S-02	颗粒白云岩	2.88089	0.68	49.18	50.82	/	100	4.8001	15.9795
NF20S-03	颗粒白云岩	2.88060	0.68	49.08	50.92	0.3	99.7	4.8003	15.9796
NF20S-04	颗粒白云岩	2.88087	0.58	49.17	50.83	/	100	4.8012	15.9873
NF20S-06	颗粒白云岩	2.87973	0.66	48.79	51.21	/	100	4.8007	15.9820
NF20S-07	颗粒白云岩	2.88507	0.64	50.57	49.43	0.8	99.2	4.7981	15.9697
NF20S-08	颗粒白云岩	2.88134	0.63	49.33	50.67	/	100	4.8804	15.9747
NF20S-09	颗粒白云岩	2.88436	0.66	50.33	49.67	/	100	4.8043	15.9930
NF20S-10	颗粒白云岩	2.88072	0.64	49.12	50.88	/	100	4.8014	15.9814
QZ12-014-01	微—粉晶白云岩	2.88656	0.59	51.07	48.93	/	100	4.8083	16.0134
QZ12-016	微—粉晶白云岩	2.89216	0.58	52.93	47.07	6.2	93.8	4.7992	15.9779
QZ12-029	微—粉晶白云岩	2.88963	0.48	52.09	47.91	4	96	4.8048	15.9676
QZ12-045	微—粉晶白云岩	2.88643	0.62	51.02	48.98	5.3	94.7	4.8040	15.9956
QZ12-004	细晶白云岩	2.88791	0.70	51.52	48.48	5.8	94.2	4.8012	15.9800
QZ12-014-02	细晶白云岩	2.88461	0.83	50.42	49.58	1.2	98.8	4.8021	15.9896
QZ12-046	细晶白云岩	2.88437	0.85	50.34	49.66	0.6	99.4	4.8061	15.9999
QZ12-063	细晶白云岩	2.88532	0.69	50.65	49.35	1.5	98.5	4.8063	15.9946
QZ12-001	细晶白云岩	2.88772	0.84	51.45	48.55	7.2	92.8	4.7966	15.9706
QZ12-007	细晶白云岩	2.88483	0.88	50.49	49.51	1.4	98.6	4.8016	15.9868
QZ12-013	细晶白云岩	2.88152	1.00	49.39	50.61	1.3	98.7	4.8004	15.9842
QZ12-028	细晶白云岩	2.88612	0.90	50.92	49.08	3.9	96.1	4.7998	15.9658
QZ12-017	细晶白云岩	2.88149	0.94	49.38	50.62	/	100	4.7998	15.9783
QZ12-015	中—粗晶白云岩	2.88784	1.00	51.49	48.51	3.1	96.9	4.7960	15.9677
QZ12-020	中—粗晶白云岩	2.88685	0.76	51.16	48.84	0.2	99.8	4.8095	16.0160
QZ12-003	中—粗晶白云岩	2.88626	0.95	50.97	49.03	2.2	97.8	4.8089	16.0139
QZ12-009	中—粗晶白云岩	2.88386	0.67	50.17	49.83	2.4	97.6	4.8050	16.0040
QZ12-012	中—粗晶白云岩	2.88354	0.94	50.06	49.94	4.7	95.3	4.8045	15.9997
QZ12-018	中—粗晶白云岩	2.88336	0.79	50.00	50.00	0.4	100	4.8007	15.9883
QZ12-026-01	中—粗晶白云岩	2.88264	0.83	49.76	50.24	/	100	4.8019	15.9846
QZ12-026-02	中—粗晶白云岩	2.88381	0.89	50.15	49.85	0.8	99.2	4.8014	15.9876
QZ12-026-03	中—粗晶白云岩	2.88658	0.83	51.07	48.93	5.4	94.6	4.7919	15.9437

注:/表示未检测或检测不出

影响因素可能包括其形成时代、岩石矿物组成、白云石晶形结构、白云石形成温度、白云石中 CaCO_3 的摩尔分数,白云化流体中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的浓度比,以及其他的二价金属阳离子等。关于白云石有序度与白云石形成时代的关系上,本次研究的样品均为中侏罗世巴通阶,没有可用作对比的样品,因此不做深入讨论,就文献调研结果来说,黄翠蓉等(1987)认为白云石的有序度受到形成时代的控制,钟倩倩等(2009)将其进一步约束为同一地区相对老的地层中白云石有序度较好,这可能是随着埋藏

成岩作用的进行,更大的埋深对应更高的埋藏温度,较高的埋藏温度能够将早期形成的有序度低的白云石有序度会升高,并逐渐趋于完全有序,但不能说明埋藏期形成的白云石有序度都高。

一般情况下,地层岩石中白云石含量越高,则白云石有序度也就越高。图 3C 中白云岩有序度与白云石含量交汇图上,本次研究的羌资 12 井样品的晶粒白云岩,其有序度和白云石含量表现出较好的正相关性,即晶粒白云岩中白云石含量越高、白云石化作用越彻底,其有序度也就越高,对喷呐湖剖

面的颗粒白云岩样品来说,结合前期研究表明,该剖面颗粒白云岩发育在咸化潟湖环境(万友利等, 2018a),伴生有大量的蒸发岩类,后期遭受强烈的淋滤、溶蚀,蒸发岩类及方解石矿物被溶蚀殆尽,因此通过X衍射进行矿物定量分析的结果中不含方解石。白云石的有序度与白云石晶体自形程度没有必然联系(张杰等, 2014c),白云石的自形程度可能与白云石生长的空间有关,若空间能够允许白云石自由生长,都可形成自形程度好的白云石晶体,但其有序度却是最初形成低有序度的白云石晶体基础上,随着成岩作用的进行,白云石中二价金属阳离子排列不断调整而提高有序度。如中—粗晶

白云岩样品 QZ12-009,最初形成的低有序度微晶白云岩经过重结晶、胶结作用变成粗晶白云岩,但其晶体的离子排列的调整程度仍然不高,从而造成其有序度仍低的特征,同时,这也说明白云石的有序度与白云石晶粒大小具正相关关系,即白云石结晶速度越慢、晶粒越大,则有序度越高,仍以样品 QZ12-009 为例,0.67 的有序度虽然低于其他中—粗晶白云岩,但仍高于微—粉晶白云岩的有序度,且在图 3C 中,排除该样品后,有序度呈现出随着“粉晶→细晶→中—粗晶”逐渐增大的趋势,埋藏环境下白云石向理想白云石方向演化。

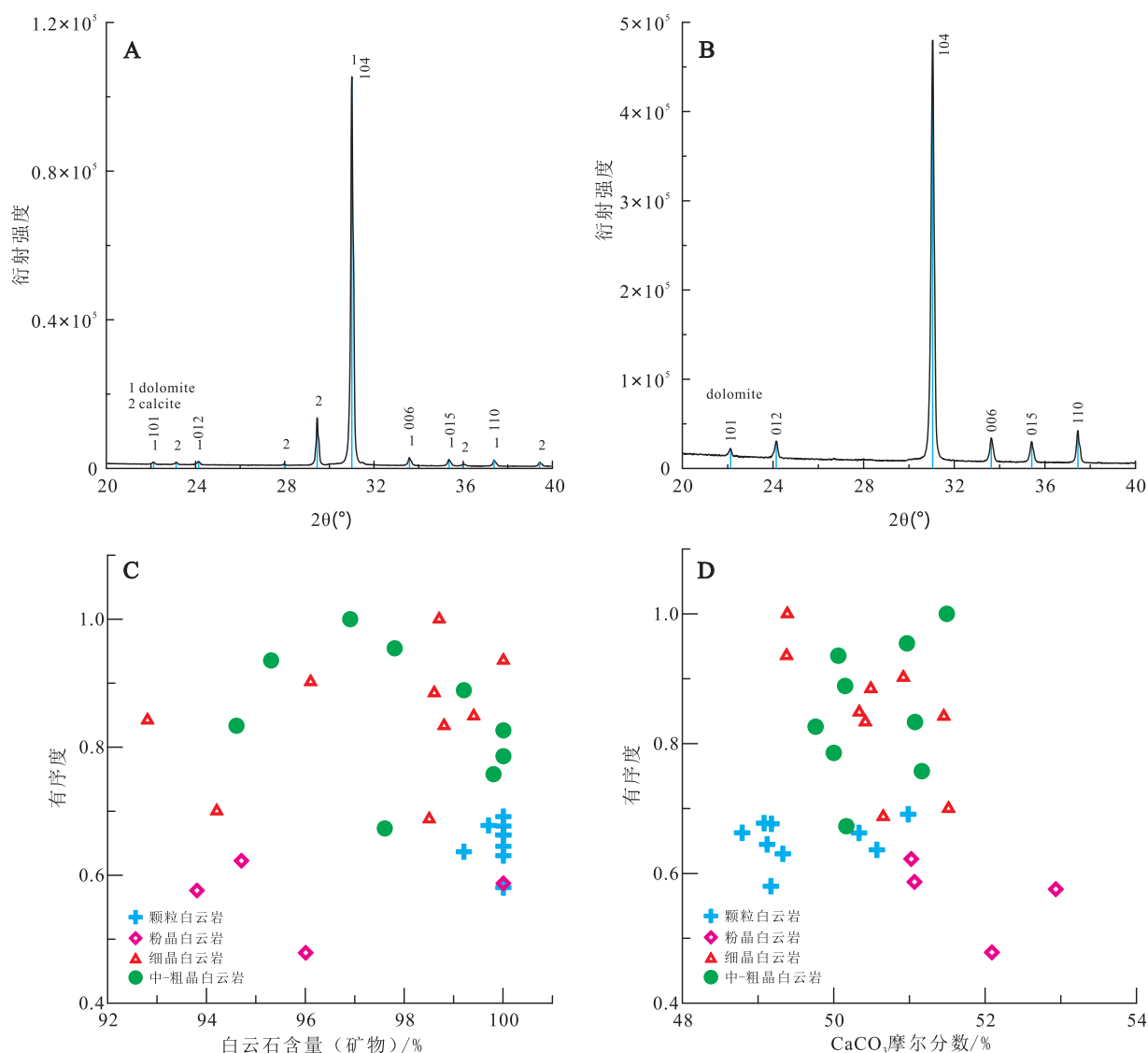


图3 羌塘盆地布曲组白云岩有序度图版及X-射线衍射图谱

A. 布曲组灰质白云岩X射线衍射图谱, QZ12-013号样品; B. 布曲组纯白云岩X射线衍射图谱, NF20S-07样品; C. 布曲组白云石含量(矿物)与有序度散点分布图; D. 布曲组白云石矿物中 CaCO_3 摩尔含量与有序度散点分布图

Fig. 3 Ordering degree charts and X-ray spectrograms of dolomite of Buqu Formation in Qiangtang Basin

白云石的有序度越高,其晶格中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 层排列越有序,摩尔分数也越接近 50%,图 3D 中,中—粗晶白云岩的 CaCO_3 摩尔分数的分布范围最为集中,且与有序度的相关性最好,细晶白云岩次之,粉晶白云岩的相关性较差。这可能与中—粗晶白云岩发育在中—深埋藏阶段,较高的地温梯度,以及漫长的白云石化作用时间,使其 CaCO_3 摩尔分数更接近理想值、有序度更接近于 1。粉晶白云岩及颗粒白云岩的有序度较低,可能说明其结晶速度较快,强蒸发背景下白云石化流体中较高的 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的浓度比,造成 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 来不及择位,短时间内难以有序排列,甚至可能以高镁方解石的形式赋存(雷怀彦和朱连芳,1992)。

5.2 晶胞参数分析及指示意义

晶胞是构成晶体的基本单元,白云石属三方晶系、六方晶胞的碳酸盐矿物,理想白云石的晶胞参数 $a = b = 4.8069 \text{ \AA}$, $c = 16.0034 \text{ \AA}$ (刘集银和王自友,1988),轴角 $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$,晶格中 CaCO_3 、 MgCO_3 分子层交替排。由于形成环境的不同,晶胞参数也会发生明显变化,如半径大于 Mg^{2+} 的 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 等二价阳离子代替 Mg^{2+} 占据 B 位,从而导致晶胞参数 c 明显增大(图 4C),可根据 c 值的大小判断白云石形成环境(张杰等,2014c),只有在稳定环境中缓慢形成的白云石,其晶胞参数才接近理想状态的值。

以晶胞参数 a 为横轴、 c 为纵轴,将 4 类白云石样品和理想白云石进行对比(图 4A),结果显示,仅有 1 件粉晶白云岩和 3 件中—粗晶白云岩样品落在晶胞参数增大的范围内,其余样品的晶胞参数均向理想白云石晶胞参数位置的左下方偏移。单独考察向右上方偏移的粉晶白云岩,结合其相对较低的有序度可能说明该白云石晶体结晶速度较快,来不及调整晶格中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的占位,晶格还未达到理想状态;对向右上方偏移的两个中—粗晶白云石样品来说,可能与中—深埋藏阶段,足够的还原条件将大半径高价态金属离子如 Fe^{3+} 还原成二价离子(Fe^{2+}),进入到碳酸盐岩晶格中,从而造成白云石晶胞参数的增大(由雪莲等,2018),结合黄翠蓉等(1987)列出的中国震旦世到现代岛白云石样品的晶胞参数,虽然前述 4 件样品的晶胞参数 a 、 c 均有不同程度的增大,但与黄翠蓉等(1987)列出的白云石样品比较,这 4 件样品的 a 、 c 增加幅度并不明显(图 4C),整体来说,样品反而表现为向左下方变

小的趋势,在理论上,即使为稳定沉降的埋藏成岩作用能够导致白云石晶体中微量元素与外界交换,白云石晶胞参数向理想白云石靠拢,其最多也仅能低至理想白云石位置,因此造成白云石晶格畸变的还另有其他原因。

除白云石本身的影响因素外,前人通过实验模拟研究温度、压力等外界条件变化对白云石晶胞参数的影响,结果表明白云石晶胞参数受不可压缩的基团- CO_3^{2-} 控制(Reeder and Wenk, 1983),图 4C 中展示 Ross and Reeder(1992)报道的压力从 0 增加到 4.69 GPa 过程中,西班牙 Eugui 白云石晶体晶胞参数 a 、 c 的相应变化,表明在压力增加增大过程中, a 、 c 具有协变的态势;图 4B 展示了 Reeder and Markgraf(1986)报道的温度从 24°C 增加到 700°C 过程中,西班牙 Eugui 白云石晶体晶胞参数 a 、 c 的相应增大过程,表明在温度升高过程中, a 、 c 同样具有协变的态势。这表明埋藏中的白云岩,若遭遇强构造应力、热流体侵入、或者长期处于异常高压环境中,均可造成白云石晶格的畸变。综合图 4 中的 4 幅小图,表明布曲组白云岩在埋藏过程中经历了复杂的地质作用,晶胞参数整体向左下方偏移,可能表明布曲组经历了强烈的构造挤压。羌塘盆地侏罗系地层沉积以后,先后经历燕山期、喜山期两次构造活动改造(刘池阳等,2002),特别是在晚白垩世,由于燕山运动(Ⅱ幕)产生大量的逆冲推覆构造(Wu, et al., 2004, 2013a, b, 2015; 李亚林等,2006; 吴珍汉等,2016; 季长军等,2019, 2020),对早期的油气藏产生严重破坏,部分油气藏被推覆至地表而暴露,遭受大气淡水淋滤、生物降解,形成古油藏。结合 Ross and Reeder(1992)的结果, a 、 c 成线性关系,并受压力控制,依据布曲组白云岩晶胞参数 a 、 c 值的分布,估计布曲组白云岩可能经受了大约 1000 MPa 的压应力,才造成晶胞参数 a 、 c 的变化,这个压应力远大于按毕洛错地区最大埋深 6000 m 计算的上覆地层压力。这也进一步证实布曲组白云岩形成之后,承受的巨大压应力并非上覆地层的压力,而是构造挤压应力,最有可能提供这个挤压应力的构造活动就是推覆体的形成,同时也表明南羌塘坳陷中侏罗统布曲组白云岩古油藏是逆冲推覆造成的结果。

5.3 对白云岩形成过程的指示

前面讨论的白云石有序度的各种影响因素,包括岩石类型、矿物组成、形成温度等,这些因素与白

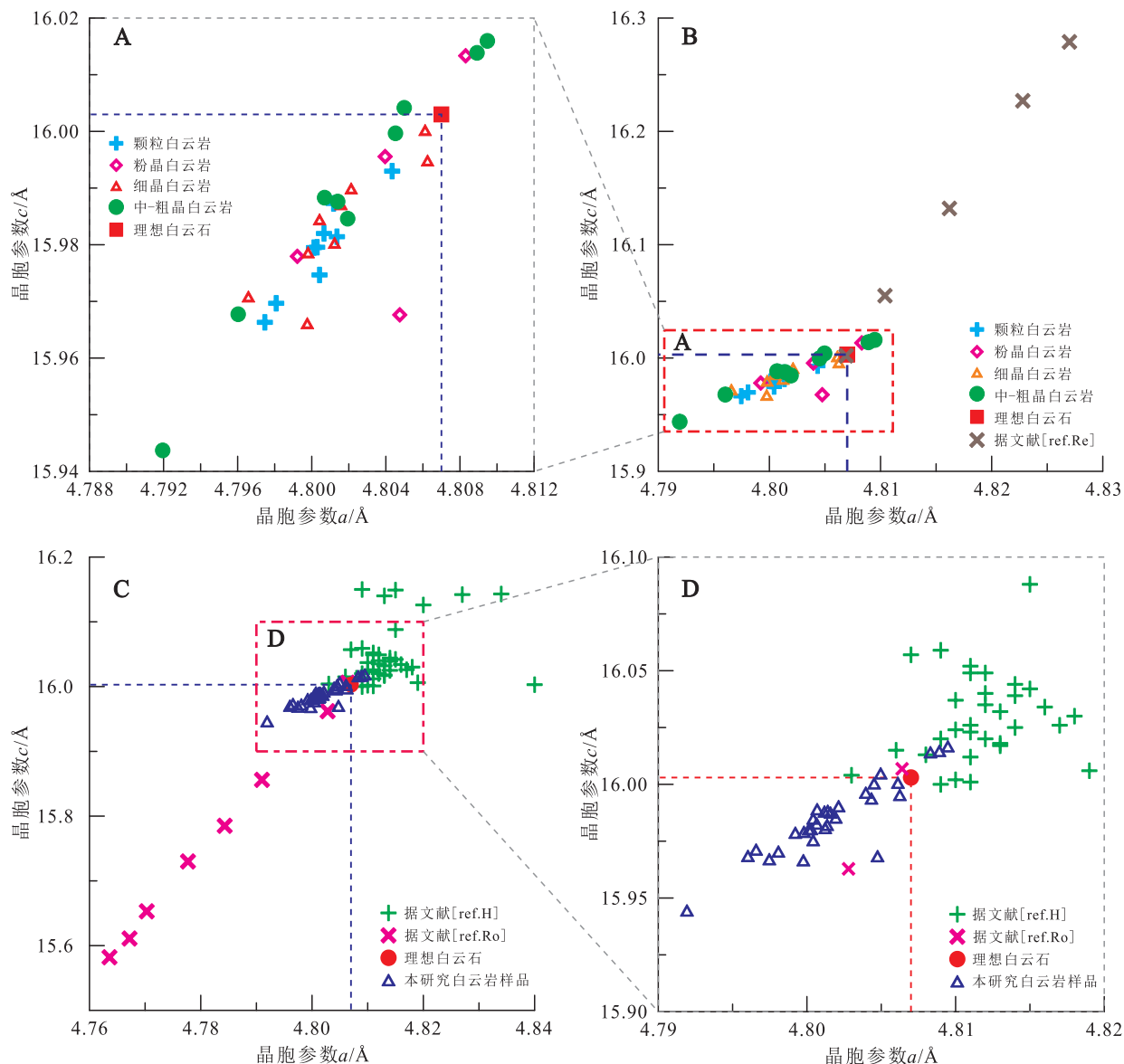


图4 羌塘盆地布曲组不同类型白云石晶胞参数图版及温度、压力对白云石晶胞参数的影响

A 布曲组不同类型白云石晶胞参数图版;B 温度对白云石晶胞参数的影响,文献[ref. Re]为(Reeder and Markgraf, 1986);C 大半径二价阳离子占位及压力对白云石晶胞参数的影响,文献[ref. Ro]为(Ross and Reeder, 1992),文献[ref. H]为(黄翠蓉等, 1987);D 研究区布曲组不同类型白云石关于“大半径二价阳离子占位及压力对白云石晶胞参数的影响”的响应,文献[ref. Ro]为(Ross and Reeder, 1992),文献[ref. H]为(黄翠蓉等, 1987)

Fig. 4 The crystal unit-cell parameter charts of different kinds of dolomite crystals at different pressures and temperatures

云石的成因机制有很大的关系。结合前期显微镜下的分类、阴极发光特征,颗粒白云岩可能对应于蒸发环境近地表快速结晶、埋藏调整的过程,3类晶粒白云岩分别对应准同生阶段、浅埋藏阶段、中深埋藏阶段的白云岩特征。

颗粒白云岩的有序度高于微—粉晶白云岩,低于细晶白云岩,表明其形成于近地表环境,结合沉积背景分析,该类白云岩在蒸发潟湖环境中,高盐度的浓缩海水能够提供高浓度的 Mg^{2+} ,有利于白云

石的快速成核,拟态交代颗粒灰岩,在埋藏过程中的重结晶使得有序度得以提高,或者颗粒灰岩以高镁方解石的形式赋存,进入埋藏阶段后经由调整白云石化作用形成白云岩。若为拟态交代成因,则其有序度在经历埋藏阶段提高过程中,有序度的分布范围较宽,这与本次研究的样品不符,则说明颗粒白云岩更大程度上是蒸发潟湖中的颗粒灰岩为高镁方解石,经历埋藏过程的调整白云石化作用形成。

微—粉晶白云岩的晶胞参数 c 小于其他晶粒白

云岩、且变化幅度较大(表1、图4A),反映其是在近地表环境中形成的;有序度低于其他的白云岩,以及阴极发光性较弱、原岩晶体粒度小,说明其可能为灰泥基质中亚稳态碳酸盐岩矿物优先选择性白云石化作用的结果。这种优先选择性白云石化作用可能发生在准同阶段,形成泥级白云石晶体难以保存,往往成为较大晶体的核心,随着浅埋藏阶段白云石化作用及晶核生长,形成粉晶白云岩。亚稳态的微晶白云岩向稳定态的粉晶白云岩发展过程中,晶胞参数会不断改变、调整,从而造成晶胞参数的变化幅度大,有利于白云石的快速成核,在准同生阶段能够以“拟态交代”的方式形成颗粒白云石,并在埋藏过程中经历重结晶使得有序度提高;或者在准同生阶段,以高镁方解石的形式赋存,不发生白云石化作用,待进入埋藏阶段后经由调整白云石化作用形成白云岩。以“拟态交代”形成,并经历“重结晶”作用的白云石,其有序度的分布范围较宽,然而本次研究的样品有序度分布范围与之不符,则说明颗粒白云岩更大程度上是蒸发潟湖中的颗粒灰岩为高镁方解石,经历埋藏过程的调整白云石化作用形成。

细晶白云岩的晶体自形程度较高,部分样品具残余颗粒幻影,阴极发光呈现清晰的环带结构,表明具有一定的次生加大现象,可能是在继承先驱灰岩的较大孔隙空间内,先驱灰岩经历交代作用和白云石的重结晶作用而成,白云石晶体能够自由生长;相对较高的有序度和近乎协变的晶胞参数,说明白云石化流体供给充足、白云石发育环境稳定,晶体自形程度变差可能与继承先驱灰岩孔隙空间的限制有关。

中—粗晶白云岩的晶体扭曲、晶体之间相互镶嵌,造成孔隙大量消失,说明这里白云石经历了对有限空间的竞争性生长。高有序度和更为集中的晶胞参数说明其经历了足够长久的白云石化过程,在足够深的埋藏条件下,充足的白云石化流体供给满足长期的白云石化作用的改造,并发生过度白云石化作用,使得白云石晶体结构致密。

6 结论

(1)羌塘盆地布曲组发育了不同成因的白云石,有着不同的有序度和晶胞参数,代表了不同的形成环境和形成过程,颗粒白云岩可能为蒸发环境中沉积的高镁方解石在埋藏阶段经由调整白云石

化作用形成,就晶粒白云岩来说,微—粉晶白云岩→细晶白云岩→中—粗晶白云岩的有序度逐渐增高,表明稳定的埋藏过程有利于白云石向有序转化。

(2)白云石的有序度和白云石的形成机制具有很好的相关性,低有序度的微—粉晶白云岩,晶胞参数变化幅度大,可能说明其发育在准同生阶段,以快速成核为主;细晶白云岩较高的有序度、较好的晶体自形程度说明在埋藏阶段白云石化流体供给充足、稳定,白云石晶体在继承先驱灰岩的孔隙中自由生长;中—粗晶的高有序度和更为集中的晶胞参数说明是在足够深的埋藏环境中,经历了足够长久的白云石化作用过程,并且白云石晶体的生长空间有限。

(3)研究区布曲组白云岩晶胞参数负偏于理想白云石的晶胞参数,可能指示了羌塘盆地经历了高强度的构造挤压运动,估算布曲组白云石晶体承受的压力可能达到1000MPa,这是对羌塘盆地晚白垩世陆内造山的响应,同时指示南羌塘坳陷布曲组白云岩古油藏是由逆冲推覆运动造成的。

致谢:野外工作期间,成都地质调查中心羌塘油气团队在采样中给予了帮助,自然资源部西南矿产资源监督检测中心王凤玉、潘忠习在实验测试和数据处理中给予了指导,研究与成文过程中多次与冯心涛高级工程师进行有益探讨,郭秀梅编辑和两位匿名审稿人提出了宝贵的建设性意见,在此一并表示衷心感谢!

参考文献(References):

- Fuchtbauer H, 1974. Sediments and sedimentary rocks [M]// Engelhardt W V, Fuchtbauer H, Muller G. Sedimentary petrology. New York-Toronto-Sydney: Halsted Press Division, John Wiley & Sons, Inc., 303-305.
- Goldsmith J R, Graf D L, 1958. Structural and compositional variations in some natural dolomites [J]. Journal of Geology, 66(6): 678-693.
- Goldsmith J R, Graf D L, Heard H C, 1961. Lattice constants of the calcium magnesium carbonates [J]. American Mineralogist, 46(3-4): 453-459.
- Goldsmith J R, Graf D L, Joensuu O I, et al., 1955. The occurrence of magnesian calcites in nature [J]. Geochimica and Cosmochimica Acta, 7(5-6): 212-228, 229-230.
- Machel H G, Mountjoy Eric W, 1986. Chemistry and environments of dolomitization-A reappraisal [J]. Earth-Science Reviews, 23(3): 175-222.

- Machel H G, 2004. Concepts and models of dolomitization: A critical reappraisal [J]. Geological Society London Special Publications, 235(1): 7–63.
- Mckenzie J A, Vasconcelos C, 2009. Dolomite mountains and the origin of the dolomite rock of which they mainly consist: Historical developments and new perspectives [J]. Sedimentology, 56(1): 205–219.
- Reeder R J, Markgraf S A, 1986. High-temperature crystal chemistry of dolomite [J]. American Mineralogist, 71(5): 795–804.
- Reeder R J, Wenk H R, 1983. Structure refinements of some thermally disordered dolomites [J]. American Mineralogist, 68(7): 769–776.
- Rosen M R, Miser D E, Starcher M A, et al., 1989. Formation of dolomite in the coorong region, south Australia [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 53(3): 661–669.
- Ross N L, Reeder R J, 1992. High-pressure structural study of dolomite and ankerite [J]. American Mineralogist, 77(3): 412–421.
- Warren J, 2000. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations [J]. Earth-Science Reviews, 52(1): 1–81.
- Wu Z H, Hu D G, Ye P S, et al., 2004. Thrusting of the north Lhasa Block in the Tibetan plateau [J]. Acta Geologica Sinica, 78(1): 246–259.
- Wu Z H, Hu D G, Ye P S, et al., 2013a. Early Cenozoic tectonics of the Tibetan plateau [J]. Acta Geologica Sinica, 87(2): 289–303.
- Wu Z H, Ye P S, Barosh P J, et al., 2013b. Early Cenozoic multiple thrusts in the Tibetan plateau [J]. Journal of Geological Research, 1–12.
- Wu Z H, Patrick J, Barosh, et al., 2015. Late Cretaceous tectonic framework of the Tibetan plateau [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 114: 693–703.
- Zhao Z Z, 2000. Conditions of petroleum geology of the Qiangtang Basin of the Qianghai-Tibet Plateau [J]. Acta Geologica Sinica, 74(3): 661–665.
- 陈文彬, 杨平, 张予杰, 等, 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.
- 黄翠蓉, 张光荣, 王英华, 1987. 我国部分地区白云岩岩石矿物学研究及其意义[J]. 地质论评, 33(5): 449–461.
- 季长军, 陈程, 吴珍汉, 等, 2000. 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, 66(5): 1186–1198.
- 季长军, 吴珍汉, 刘志伟, 等, 2019. 羌塘盆地逆冲推覆构造特征及油气资源效应[J]. 地质力学学报, 25(S1): 66–71.
- 雷怀彦, 朱莲芳, 1992. 四川盆地震旦系白云岩成因研究[J]. 沉积学报, 10(2): 69–78.
- 李鑫, 伊海生, 金峰, 等, 2018. 羌塘盆地隆鄂尼-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), 45(2): 142–153.
- 李亚林, 王成善, 伊海生, 等, 2006. 西藏北部新生代大型逆冲推覆构造域唐古拉山的隆起[J]. 地质学报, 80(8): 1118–1130, 1234.
- 刘池阳, 杨兴科, 魏永佩, 等, 2002. 藏北羌塘盆地西部查桑地区结构与构造特征[J]. 地质论评, 48(6): 593–602.
- 刘集银, 王自友, 1988. 白云石的晶体结构特征和 X-射线研究[J]. 矿物岩石, 8(1): 30–35.
- 刘建清, 陈文彬, 杨平, 等, 2008a. 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, 24(6): 1379–1469.
- 刘建清, 陈文斌, 杨平, 等, 2008b. 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, 29(1): 72–80.
- 刘建清, 贾保江, 杨平, 等, 2008c. 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, 26(1): 29–37.
- 刘建清, 杨平, 陈文彬, 等, 2010. 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]. 地学前缘, 17(1): 312–321.
- 孙伟, 陈明, 万友利, 等, 2020. 封闭系统中的白云石化作用过程及其油气地质意义——以南羌塘坳陷中侏罗统布曲组白云岩为例[J]. 地质论评, 66(5): 1217–1229.
- 谭富文, 张润合, 王剑, 等, 2016. 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), 43(5): 513–521.
- 万友利, 王剑, 付修根, 等, 2018a. 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), 45(2): 4–16.
- 万友利, 王剑, 付修根, 等, 2018b. 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, 38(2): 25–37.
- 万友利, 王剑, 谭富文, 等, 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.
- 王剑, 付修根, 沈利军, 等, 2020. 论羌塘盆地油气勘探前景[J]. 地质论评, 66(5): 1091–1113.
- 王茂林, 周进高, 陈冬霞, 等, 2013. 白云石成因模式的研究进展及其适用性探讨[J]. 海相油气地质, 18(2): 31–40.
- 王兴涛, 张庆石, 张吉, 等, 2000. 青藏高原中生界白云岩特征研究及成因分析[J]. 沉积学报, 18(4): 555–559.
- 王泽宇, 乔占峰, 寿芳漪, 等, 2020. 塔里木盆地永安坝剖面蓬莱坝组白云岩成因与形成过程——来自有序度和晶胞参数的证据[J]. 天然气地球科学, 31(5): 602–611.
- 吴珍汉, 刘志伟, 赵珍, 等, 2016. 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, 90(4): 615–627.
- 伊海生, 陈志勇, 季长军, 等, 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): 737–782.
- 伊海生, 高春文, 张小青, 等, 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.
- 由雪莲, 贾文强, 徐帆, 等, 2018. 铁白云石矿物学特征及原生次生成因机制[J]. 地球科学, 43(11): 4046–4055.
- 曾理, 万茂霞, 彭英, 2004. 白云石有序度及其在石油地质中的应用[J]. 天然气勘探与开发, 27(4): 64–66.

- 张杰, Jones B, 潘立银, 等, 2014a. 四川盆地震旦系灯影组葡萄状白云岩成因[J]. 古地理学报, 16(5):715-725.
- 张杰, Jones B, 张建勇, 2014b. 不同埋藏深度交代白云石晶体结构及其对白云岩储层研究的意义[J]. 中国石油勘探, 19(3):21-28.
- 张杰, 寿建峰, 张天付, 等, 2014c. 白云石成因研究新方法——白云石晶体结构分析[J]. 沉积学报, 32(3):550-559.
- 张立强, 纪友亮, 李永铁, 等, 2001. 羌塘盆地侏罗系白云岩储层特征研究[J]. 石油实验地质, 23(4):384-389.
- 张小青, 伊海生, 朱迎堂, 等, 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.
- 郑剑锋, 沈安江, 乔占峰, 等, 2013. 塔里木盆地奥陶统蓬莱坝组白云岩成因及储层主控因素分析——以巴楚大班塔格剖面为例[J]. 岩石学报, 29(9):3223-3232.
- 郑剑锋, 沈安江, 乔占峰, 等, 2014. 柯坪-巴楚露头区蓬莱坝组白云岩特征及孔隙成因[J]. 石油学报, 35(4):56-64.
- 钟倩倩, 黄思静, 邹明亮, 等, 2009. 碳酸盐岩中白云石有序度的控制因素——来自塔河下古生界和川东北三叠系的研究[J]. 岩性油气藏, 21(3):50-55.
- 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):30-41.

Controlling factors and their geological significances of order degrees and unit-cell parameters of dolomites in the Middle Jurassic Buqu Formation in Qiangtang Basin

WAN Youli^{1,2}, ZHAO Zhan^{1,2 *}, HU Zhizhong², LI Xueren^{1,2}

(1. Key Laboratory of Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610081, China; 2. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China)

Abstract: This paper discusses the characteristics, controlling factors and geological significances of the order degrees and unit cell parameters of the Middle Jurassic Buqu Formation dolomites in Qiangtang Basin. Basing on the detailed classification of dolomites in the early stage, the X-ray powder diffraction method is used to test the dolomite, and the Jade 6.5 software is used to process the test results. The maximum crystal plane spacing, order degrees, unit cell parameters and relevant information of dolomite are obtained, and the controlling factors and geological significance are discussed. The results show that: (1) The grain dolomites in Suona Lake area of the north Qiangtang Depression, which are with low to medium order degrees and concentrated unit cell parameters, develops in an evaporation lagoon environment from high magnesium calcites by the adjustment of dolomitization during the burial process; (2) To the dolomites of the Buqu Formation in the South Qiangtang Depression, the micro-powder crystalline dolomites with a large distribution range of order degrees and unit cell parameters are formed by rapid metasomatism of limestone in penesynchronous stage and recrystallization in burial stage; The fine-grained dolomites with a high degree of order and a positive correlation of unit cell parameters develop in a stable burial environment and the dolomite crystals grow freely in the pores of the inherited limestone; The medium-coarser-grained dolomite, whose degree of order is the highest, has experienced a long process of dolomitization in the middle-deep burial stage, and the narrow spaces limit the free growth of crystals. From micro-powder dolomite to fine-grain dolomite to medium-coarser-grain dolomite, the order degree of dolomites increases gradually, indicating that the stable burial process is conducive to the orderly transition of dolomites. (3) The “a” and “c” of unit cell parameters of the Buqu Formation dolomites shifted to the lower left of the ideal dolomite in different degrees, indicating that the Buqu Formation dolomites experienced a strong tectonic compression with an estimated pressure up to 1000 MPa after its formation, which is related to the tectonic movement of the late Cretaceous. It is suggested that the dolomite paleo-oil reservoir of Buqu Formation in southern Qiangtang Depression is caused by the thrust nappe tectonic movement.

Key words: Qiangtang Basin; Buqu Formation; dolomitization; order degree of dolomite; unit-cell parameters