

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

季长军^{1,2,3)}, 陈程¹⁾, 吴珍汉⁴⁾, 伊海生⁵⁾, 夏国清⁵⁾, 赵珍⁴⁾

1) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081;

2) 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京, 100081;

3) 中国地质科学院页岩油气调查评价重点实验室, 北京, 100081;

4) 中国地质科学院, 北京, 100037; 5) 成都理工大学沉积地质研究院, 成都, 610059

内容提要: 羌塘盆地隆鄂尼—昂达尔错古油藏带中侏罗统布曲组砂糖状白云岩储集层成因一直备受关注和争议。白云岩成因及其储层预测对于碳酸盐岩油气藏勘探具有重要意义,但是关于羌塘盆地布曲组白云岩的成因并没有一个相对统一的认识,争议核心聚焦在白云岩化流体性质。笔者等试图在包裹体测温和盐度分析的基础上,利用同位素分馏方程系统研究白云岩包裹体碳—氧同位素,探讨羌塘盆地侏罗系砂糖状白云岩白云岩化流体特征。研究表明白云石包裹体和灰岩方解石包裹体均—温度分布范围皆为 50~220°C,但白云石的包裹体温度峰值分布区间明显要高于方解石的峰值温度,多数样品的温度集中在 150°C 到 220°C 区间;另外,与同层灰岩相比,白云岩具有明显的重碳同位素异常富集特征,该特征是高温流体交代石灰岩或者说是水岩反应的标志;此外,通过碳—氧同位素分馏方程计算出白云岩包裹体流体碳、氧同位素分别为 $-1.30\text{‰} \sim 1.53\text{‰}$ 和 $5.81\text{‰} \sim 12.50\text{‰}$, 具有高盐度的卤水特征。综合包裹体温度、盐度,以及包裹体碳、氧同位素特征,本文认为羌塘盆地布曲组砂糖状白云岩是热液交代白云岩化产物。

关键词: 包裹体; 碳—氧同位素; 白云岩成因; 古油藏带; 热液交代成因; 羌塘盆地; 青藏高原

从全球油气藏分布格局上看,碳酸盐岩油气藏储量大于碎屑岩油气藏储量,约占石油和天然气总储量的 60%,而且白云岩是碳酸盐岩油气藏储层主要类型,碳酸盐岩油气藏超过 90% 的油气储量主要赋存于白云岩储集层中(白国平, 2006)。从油藏储层分布时代上看,下古生代及三叠纪碳酸盐岩油气田储层基本上是白云岩。从油藏储层分布地域上看,国外加拿大阿尔伯达盆地和西部沉积盆地 Presquile 障壁岛泥盆纪生物礁白云岩、美国得克萨斯州 Comanche 区下白垩统和北美二叠纪盆地以及中东侏罗系阿拉伯组都是以白云岩储集层油藏为主;国内四川盆地、塔里木盆地以及鄂尔多斯盆地均发育大量白云岩储层(张帅, 2016)。白云岩成因对于储层预测和勘探部署具有重要的指导意义(雷亚军等, 1994; 朱东亚等, 2012; 张帅, 2016; 李明隆等, 2020; 黄理力等, 2020; 赖锦等, 2020)。

羌塘盆地南部双湖地区作为中国油气勘探的候

选区,其中最为引人瞩目的隆鄂尼—昂达尔错古油藏砂糖状白云岩储集层备受关注(Zhao Zhengzhang, 2000)。早期学者根据白云岩与蒸发岩的相互关系提出布曲组白云岩同生沉积成因模式(朱井泉等, 2000);随着测试手段多样性,根据岩石结构、同位素地球化学、元素地球化学等研究结果,不同学者皆提出隆鄂尼地区的白云岩是混合水成因(伊海生等, 2004; 张小青等, 2005; 陈文彬等, 2006; 刘建清等, 2008a,b, 2010),这是目前关于羌塘盆地古油藏布曲组白云岩最普遍的成因认识;近年来,随着包裹体测试技术提高,以及微区元素和同位素技术的发展,白云岩埋藏成因在布曲组白云岩化机制中的意义越发显著(伊海生等, 2014, 张帅等, 2016a,b; 金峰, 2017; 季长军, 2017; 万有利等, 2017; 李鑫等, 2018; 田康志等, 2019)。综上所述,羌塘盆地布曲组白云岩的成因争议核心问题集中在如下两个方面,其一是羌塘盆地的白云岩是浅埋藏低温交代成因还

注:本文为中国地质调查局地质调查项目(编号:DD20160161)的成果。

收稿日期:2020-07-08; 改回日期:2020-08-11; 责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2020.05.008

作者简介:季长军,男,1986 年生,博士,助理研究员,主要从事石油地质和沉积地质研究;Email: jichangjun2007@sina.com。

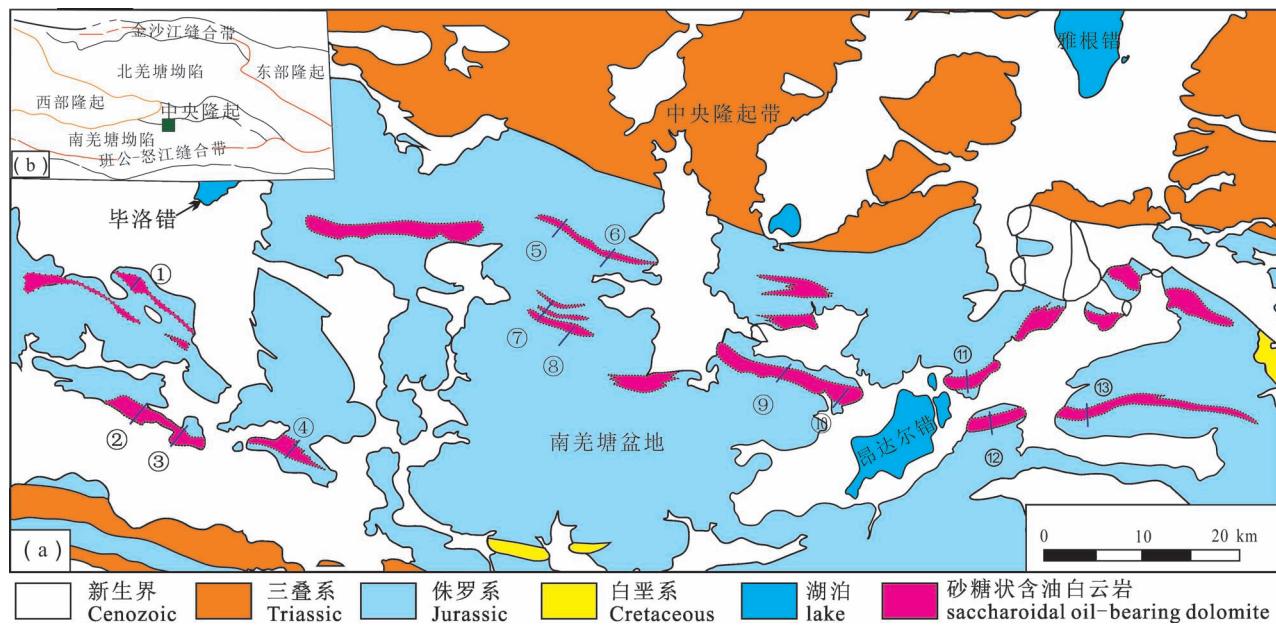


图 1 羌塘盆地白云岩分布及采样剖面位置图(a)和羌塘盆地构造位置图(b)

Fig. 1 Distribution and sampling location of dolostones of the Buqu Formation in the Qiangtang Basin (a)
and tectonic location of the Qiangtang Basin (B)

砂糖状含油白云岩剖面:①—孔日热跃剖面(KRP);②—格鲁观那剖面(LP02);③—查来剖面(LP06);④—德如日剖面(LP03);⑤—扎仁西剖面(ZP01);⑥—扎仁东剖面(ZP02);⑦—碾扎剖面(ZP03);⑧—加木尔且剖面(NP);⑨—巴格底加日剖面(AP01);⑩—日尕日保剖面(RP);⑪—扎东来玛剖面(AP02);⑫—昂罢存咚剖面(SP01);⑬—赛仁剖面(SP02)
saccharoidal oil-bearing dolostone section:①—Kongerreyue section(KRP);②—Geluguanna section(LP02);③—Chalai section(LP06);④—Deruri section(LP03);⑤—Zharen section(ZP01);⑥—east Zharen section(ZP02);⑦—Nianzha section;⑧—Jiamuerqie section(NP);⑨—Bagedijiari section(AP01);⑩—Rigaribao section(RP);⑪—Zhadonglaima section(AP02);⑫—Angbacundong section(SP01);⑬—Sairen section(SP02)

是深埋藏高温交代成因,是正常地温梯度条件下白云石化的产物还是异常高温热流体交代白云石化的结果?其二是白云石化流体是淡水、海水还是浓缩的卤水?针对这两个白云岩化关键问题,笔者等试图在包裹体测温和盐度分析的基础上,结合白云岩碳—氧同位素,利用同位素分馏方程系统研究羌塘盆地中侏罗统布曲组砂糖状白云岩包裹体中流体特征,提出羌塘盆地布曲组砂糖状白云岩是高温高盐度卤水改造作用的产物。

1 地质背景

羌塘盆地处于青藏高原腹地,盆地位于喜马拉雅—冈底斯板块和可可西里—巴颜喀拉板块之间,南以班公湖—怒江缝合带为界、北以可可西里—金沙江缝合带为界,东西则以侏罗纪地层尖灭为界,总面积约 $18.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,呈菱形盆地东西向展布(夏国清等,2009)(图1b)。盆地以中生代海相沉积地

层为主的残留盆地,具有两坳一隆格局,内部构造复杂,地层出露以海相三叠系和侏罗系为主,且侏罗系海相、海陆交互相沉积,具有“三砂夹二灰”的岩性组合特征,即自下而上由下部雀莫错组、中部夏里组和上部雪山组三个层位构成的以(含膏)杂色碎屑岩系为主的岩石地层单元及由下部布曲组、上部索互组两个层位构成的以碳酸盐岩为主的岩石地层单元(朱同兴,1999)。

羌塘盆地地表见大量的油气显示,其中液态油气显示集中分布在南羌塘坳陷布曲组砂糖状白云岩储集层中(季长军,2015)。油浸砂糖状白云岩地表分布范围极广,西至隆鄂尼—格鲁关那,东至昂达尔错—扎仁,集中分布于东西 150 km、南北 30 km 范围,构成隆鄂尼—昂达尔错古油藏带(季长军等,2016;夏国清等,2016)(图 1a),油层赋存于岩性为深黑色、黑色砂糖状晶粒白云岩之中。

2 采样位置与研究方法

研究样品采自隆鄂尼、格鲁关那、德如日、巴格

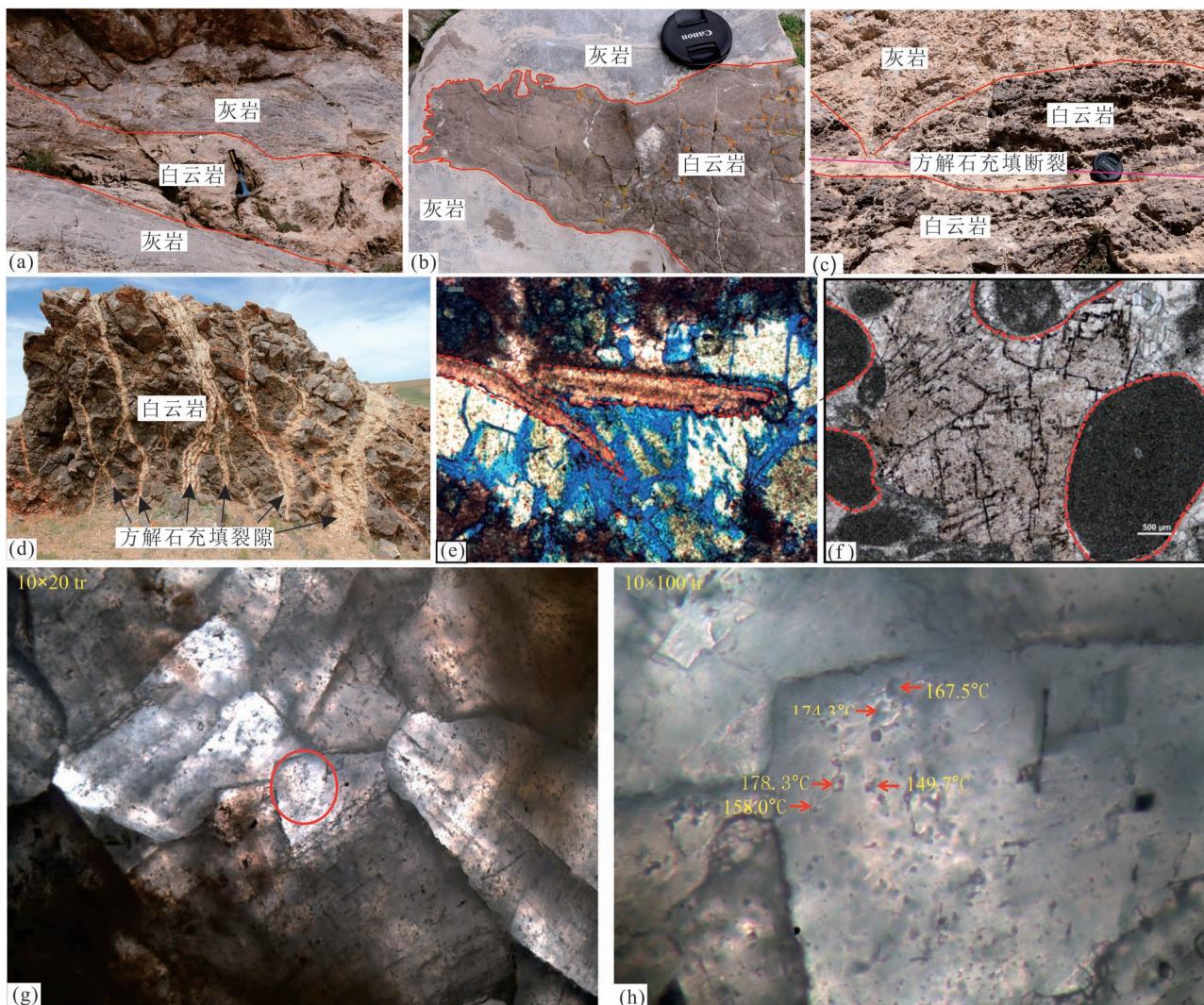


图 2 羌塘盆地白云岩及白云岩包裹体特征

Fig. 2 Morphological characteristics and inclusions of dolostone in the Qiangtang Basin

(a) 白云岩呈似层状分布,且跟上下灰岩层接触界限不清晰;(b) 白云岩呈火焰状刺穿灰岩地层;(c) 灰岩地层中沿断裂分布的白云岩块;(d) 白云岩中存在大量方解石充填裂隙;(e) 白云岩中存在方解石质生物碎屑残余结构;(f) 白云岩中存在方解石质藻团块残余结构;(g) 白云石晶粒结构,外层亮边结构包裹体发育;(h) 亮边包裹体均一温度 $149.7^{\circ}\text{C} \sim 178.3^{\circ}\text{C}$ (g 局部放大)

(a) the contact boundary between the lay-like dolostone and upper/ lower limestone layers is not clear; (b) the dolostone penetrates the limestone strata in the form of flame; (c) dolostone blocks distributed along faults in limestone formations; (d) there are a lot of calcite filling fractures in dolostone; (e) there are relic structures of calcite bioclastic in the dolostone; (f) there are relic structures of calcite algal masses in dolostone; (g) dolomite grain structure, and mass inclusion in outer bright edge structure of the dolomite; (h) the uniform temperature of the inclusions in outer bright edge structure of the dolomite is $149.7 \sim 178.3^{\circ}\text{C}$ (fig. h enlarged)

底加日、昂罢存咚、扎东来玛、扎仁东、扎仁西、扎仁南、牙尔根等 10 条地表露头剖面,样品主要为布曲组晶粒白云岩及白云岩互层灰岩样品。白云岩大多数似层状展布,侧向延伸相对稳定(图 2a),也有部分白云岩呈火焰状刺穿灰岩地层(图 2b),或者在灰岩地层中沿断裂呈白云岩岩块分布(图 2c),并且白云岩地层方解石脉普遍发育,形成密集的网格(图 2d)。白云岩晶粒结构,中厚层状构造,常与介壳灰

岩、内碎屑灰岩和鲕粒灰岩伴生,同时白云岩储集层中也保留大量生物残余结构和生物幻影结构(图 2e,f)。此外为了对比研究,选取远离古油藏带分布区,且灰岩地层未见白云岩化的董布拉剖面布曲组和索瓦组灰岩样品。测试分析前对样品进行岩矿鉴定工作,通过薄片茜素红染色处理,详细观测方解石和白云石岩石结构,选取典型样品开展包裹体和全岩碳—氧同位素分析。

包裹体温度测试采用英国 THMSG600 型冷热台,该仪器测温下限是 -196°C ,可测最高温度达 600°C ,加热/冷冻速率在 $0.01\sim 130^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 之间,测温精度 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 。在包裹体测温过程中控温速率设置为 $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$,但是在相变点附近速率降低至 $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。全岩碳—氧同位素分析采用磷酸盐法,选取 25°C 和 75°C 的恒温条件,分步提取方解石和白云石中的 CO_2 , CO_2 经纯化收集并送至 MAT252 气体同位素质谱仪分析,检测结果采用 PDB 标准,以 $\delta\text{‰}$ 单位表示,同位素测试精度 $\delta \pm 0.1\text{‰}$ 。

3 包裹体特征

样品分析和测量的包裹体主要有白云石和裂缝填充方解石两类宿主矿物(伊海生等,2007),包裹体类型主要包括烃类包裹体、盐水包裹体,以及含烃盐水包裹体三大类型,其中烃类包裹体按烃类组分呈现出纯液态烃相、纯气态烃相、以及液态和气态烃混合相三种相态,分别构成液态烃相有机包裹体、气态烃相有机包裹体或气液烃混合相有机包裹体;盐水包裹体基本上呈无色透明状态,其中不含有子矿物,加热可均一到液相;含烃盐水包裹体中不仅含有盐水溶液,而且不同程度富含气液态烃组分。盐水包裹体大量分布在方解石脉和白云石颗粒内部和边部;而烃类包裹体主要发育于方解石脉中,少数分布在白云石颗粒的边部,亦有切穿颗粒边界,进入方解石脉中,并且烃类包裹体在方解石脉中呈串珠状排列分布,表现为非常明显的不混溶特征。

羌塘盆地布曲组白云岩储层包裹体的大小形态差异性比较大,存在长方形、正方形、圆形、椭圆形和不规则形等形式,而包裹体主要呈现出浅色色调,且以无色透明包裹体为主,主要产出于白云石颗粒和次生加大边。白云石烃类包裹体数量相对比较少,通常形态较小,大小仅有 $2\sim 6\text{ }\mu\text{m}$,且与宿主矿物折射率相差较大而两者界线明显,包裹体呈现清晰轮廓,该类包裹体在镜下呈淡黄色或无色透明,通常大部分分布于白云石颗粒边部。含烃盐水包裹体数量较多,因为气、液两相比重差异和表面张力关系,气相烃常常以球形或椭球形悬浮在液相中,尤其是在气液比值较小的时候,气相烃变成气泡在液相中能够来回跳动(冯乔等,2006)。气液两相含烃盐水包裹体在含油白云岩中比较发育,不管是在白云石颗粒内部,还是在白云石胶结物中都普遍发育,它的个体通常较大,一般在 $4\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 之间,很少见到小于 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的流体包裹体,气相和液相颜色都较浅,无色

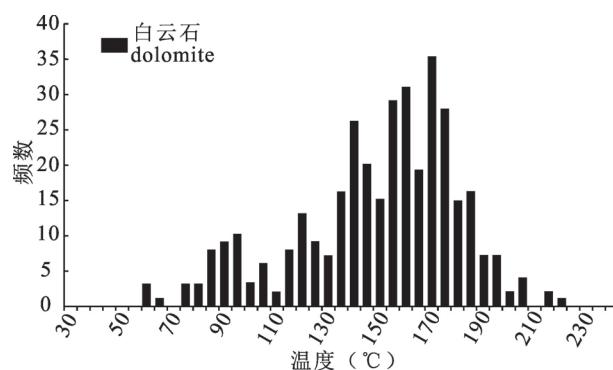


图 3 羌塘盆地白云石流体包裹体均一温度分布图

Fig. 3 Homogenization temperature histogram of fluid inclusions from dolomites in the Qiangtang Basin

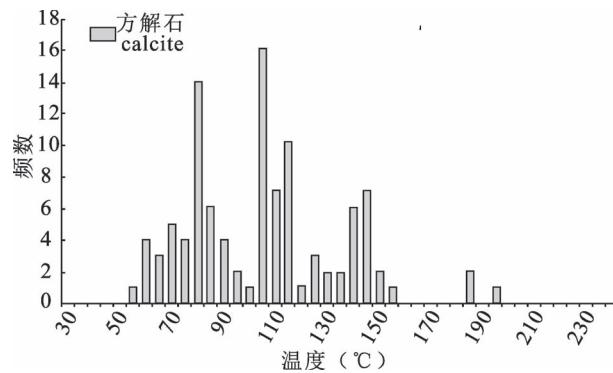


图 4 羌塘盆地方解石流体包裹体均一温度分布图

Fig. 4 Homogenization temperature histogram of fluid inclusions from calcite in the Qiangtang Basin

透明或淡黄色。盐水包裹体在宿主矿物中含量最为丰富,个体体小,普遍 $2\sim 8\text{ }\mu\text{m}$ (图 2)。

4 流体包裹体均一温度和盐度

包裹体薄片制备后镜下检查发现 32 件样品白云石矿物中见有流体包裹体,在 10 件样品中发现裂隙和孔洞充填的方解石矿物中发育流体包裹体,其中白云石温度测点 360 个,方解石温度测点 104 个。样品中方解石温度分布范围在 $50\sim 210^{\circ}\text{C}$ 之间,但以小于 150°C 样品居多,仅有个别样品测点温度大于 150°C ,同时可以发现,方解石脉的温度分布分散,主峰不明显,可观察到 80°C 、 100°C 、 140°C 三个相对集中的分布(图 3);而与之比较,白云石晶粒的均一温度分布区间在 50°C 至 220°C 区间,分布相对集中,以 170°C 为主峰包裹体分布区间为主,但同时也存在一个 80°C 低温主峰。虽然白云石与方解石温度区间大体重合,但白云石的包裹体温度峰值分布区间明显要高于方解石脉的峰值温度,多数样品的温度集

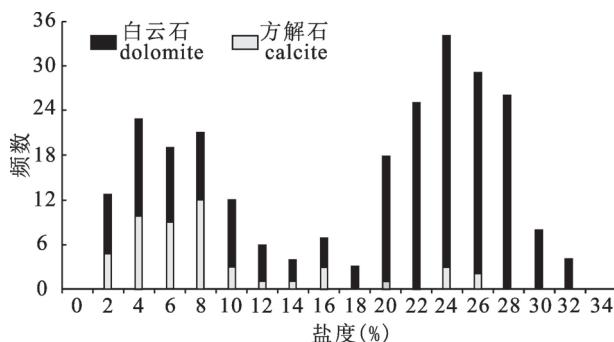


图 5 羌塘盆地白云石和方解石流体包裹体盐度分布图

Fig. 5 Homogenization salinity histogram of fluid inclusions from calcite and dolomites in the Qiangtang Basin

中在 150℃ 到 220℃ 区间, 白云石的高温分布区与方解石的低温分布区显示明显的对比(图 4)。从流体包裹体盐度分析的数据来看, 白云石化的流体一般为盐水或含烃盐水, 盐度最大值为 31.7% NaCl_{eq}, 集中分布于 0.4%~18% NaCl_{eq} 和 18%~28% NaCl_{eq} 两个区段(图 5)。

5 包裹体宿主矿物碳、氧同位素

虽然白云岩碳、氧同位素组成对于白云岩成因机制具有重要的指示意义, 但白云岩碳、氧同位素组成受白云岩化原岩的碳—氧同位素组成、以及白云岩化过程中流体特征、温度和盐度的影响。因此, 在采用碳、氧同位素判断白云岩成因的时候, 有必要讨论其原岩的碳、氧同位素组成。布曲组白云岩具有典型的交代组构, 尤其保留了大量的颗粒灰岩的残余或幻影结构, 因此其原岩是布曲组灰岩, 尤其是颗粒灰岩。本文选取羌塘盆地侏罗纪两套典型灰岩地层, 即中侏罗统布曲组和上侏罗统索瓦组灰岩开展碳—氧同位素分析, 以布曲组灰岩作为白云岩化原岩。

从图 6, 表 1 可以发现, 索瓦组和布曲组灰岩碳同位素分布基本一致, 主要分布在 0.1‰~3‰ (PDB) 之间, 但是布曲组灰岩氧同位素分布范围 -8.1‰~-13.02‰ (PDB), 索瓦组灰岩氧同位素分布范围 -3.5‰~-7.86‰ (PDB), 两者存在明显的差异。氧同位素分馏理论和分馏方程研究结果表明: 碳酸盐岩沉积物氧同位素通常会随温度上升而降低, 布曲组灰岩较索瓦组灰岩氧同位素明显偏负验证了这一氧同位素演化趋势, 同时也在一定程度上检验了全岩碳—氧同位素值相对可靠, 能够记录灰岩原始沉积信息。同时, 对于布曲组灰岩和白云

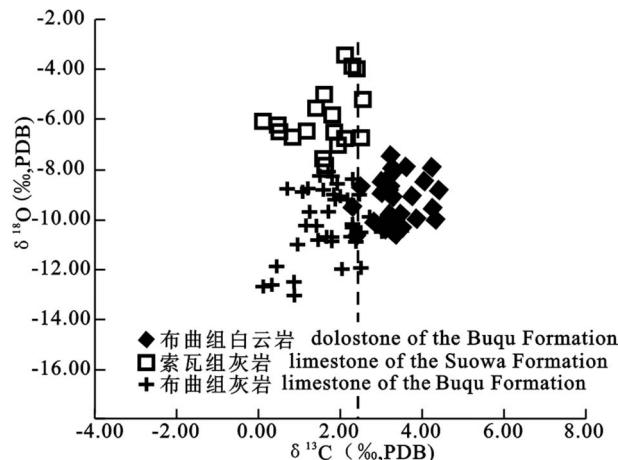


图 6 羌塘盆地布曲组白云岩, 以及布曲组和索瓦组灰岩碳—氧同位素分布

Fig. 6 Distribution of carbon and oxygen isotopes for the Suwa Formation and Buqu Formation in the Qiangtang Basin

岩碳—氧同位素分布也具有明显的规律性: 布曲组白云岩氧同位素整体上略高于灰岩, 这也符合水—岩反应过程中氧同位素交换平衡规律的, 方解石—白云石共生矿物对氧同位素组成关系往往被用于替代白云石—水之间的氧同位素关系, 假设该矿物对处于平衡状态, 理论上白云石与方解石共生矿物对氧同位素的差值是固定的 (Vasconcelos et al., 2005), 但是实际结果并非如此简单, 不同学者获得的差值分布非常离散, 并且由此还引发一个新问题 (Land, 1980)。尽管如此, 但是方解石与白云石共生矿物对之间氧同位素差值是存在的, 并且方解石氧同位素比白云石略轻 2‰~3‰ (Milliken et al., 1981)。此外, 布曲组白云岩碳同位素明显高于灰岩, 其中白云岩碳同位素 2.30‰~4.41‰ (PDB), 平均 3.37‰ (PDB); 灰岩碳同位素 0.1‰~3.0‰ (PDB), 平均 1.68‰ (PDB)。羌塘盆地布曲组白云岩表现出重碳同位素异常富集的特征, 这点在笔者等的前期研究中也得到证实 (田康志等, 2019)。

6 流体包裹体碳—氧同位素

一般可以通过爆破法获取流体包裹体的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值 (卢焕章等, 2004), 但包裹体宿主矿物, 即碳酸盐岩矿物受热会分解产生二氧化碳, 这对包裹体流体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 干扰极大 (王大锐, 2000), 因此往往不能直接对白云岩包裹体采用爆破法测定其碳、氧同位素, 而是采用白云石与流

表1 羌塘盆地白云岩与灰岩碳—氧同位素值

Table 1 Geochemical characteristics of carbon and oxygen isotopes for calcite and dolomites in the Qiangtang Basin

序号	样品号	岩性	层位	碳同位素 (‰PDB)	氧同位素 (‰PDB)	注备	序号	样品号	岩性	层位	碳同位素 (‰PDB)	氧同位素 (‰PDB)	注备
1	HSP82b1	灰岩	J ₃ s	0.46	-6.17	刘建清等,2007	43	5	泥晶灰岩	J ₂ b	2.3	-10.3	实测
2	HSP60b1	灰岩	J ₃ s	1.65	-7.86	刘建清等,2007	44	16	泥晶灰岩	J ₂ b	1.8	-10.9	实测
3	HSP56b1	灰岩	J ₃ s	1.17	-6.44	刘建清等,2007	45	26	泥晶灰岩	J ₂ b	2.7	-9.9	实测
4	HSP50b1	灰岩	J ₃ s	2.48	-6.73	刘建清等,2007	46	34	泥晶灰岩	J ₂ b	3	-10.5	实测
5	HSP43b2	灰岩	J ₃ s	2.14	-6.76	刘建清等,2007	47	54	泥晶灰岩	J ₂ b	2.5	-11.9	实测
6	HSP40b1	灰岩	J ₃ s	1.6	-7.56	刘建清等,2007	48	55	泥晶灰岩	J ₂ b	2.5	-10.5	实测
7	17	泥晶灰岩	J ₃ s	2.54	-5.22	张玉修等,2006	49	57	泥晶灰岩	J ₂ b	2	-9.1	实测
8	16	泥晶灰岩	J ₃ s	1.96	-6.98	张玉修等,2006	50	59	泥晶灰岩	J ₂ b	2.3	-10.2	实测
9	13	泥晶灰岩	J ₃ s	1.84	-6.5	张玉修等,2006	51	BD30-2	微晶灰岩	J ₂ b	0.89	-13.02	实测
10	DQ-3-wl1	泥晶灰岩	J ₃ s	0.1	-6.1	梁文君等,2015	52	P6-B1	颗粒灰岩	J ₂ b	2.06	-11.99	实测
11	DQ-8-wl	泥晶灰岩	J ₃ s	0.5	-6.5	梁文君等,2015	53	P9-B1	微晶灰岩	J ₂ b	0.46	-11.86	实测
12	DQ-9-wl	泥晶灰岩	J ₃ s	1.8	-5.8	梁文君等,2015	54	P15-B2	颗粒灰岩	J ₂ b	1.71	-9.68	实测
13	DQ-11-wl1	泥晶灰岩	J ₃ s	1.4	-5.6	梁文君等,2015	55	GP32-B1	生屑灰岩	J ₂ b	1.84	-9.04	实测
14	DQ-11-wl2	泥晶灰岩	J ₃ s	2.3	-3.9	梁文君等,2015	56	BD16-B4	粉屑灰岩	J ₂ b	2.27	-10.71	实测
15	DQ-12-wl	泥晶灰岩	J ₃ s	2.4	-4	梁文君等,2015	57	AD03-B3	粗晶白云岩	J ₂ b	3.3	-7.96	实测
16	DQ-13-wl	泥晶灰岩	J ₃ s	1.6	-5	梁文君等,2015	58	AD03-B	粉晶白云岩	J ₂ b	4.06	-8.51	实测
17	DQ-14-wl	泥晶灰岩	J ₃ s	0.8	-6.7	梁文君等,2015	59	AD03-D	粉晶白云岩	J ₂ b	4.23	-7.9	实测
18	DQ-15-wl	泥晶灰岩	J ₃ s	2.1	-3.5	梁文君等,2015	60	LP3-B1	细晶白云岩	J ₂ b	3.21	-8.69	实测
19	HJP6b1	灰岩	J ₂ b	2.48	-9.02	刘建清等,2007	61	LP5-B	细晶白云岩	J ₂ b	3.02	-8.51	实测
20	HJP2b1	灰岩	J ₂ b	1.58	-8.86	刘建清等,2007	62	LP8-B1	细晶白云岩	J ₂ b	3.02	-8.94	实测
21	NP46	泥晶灰岩	J ₂ b	1.9	-8.6	谭富文等,2004	63	BD30-1	粗晶白云岩	J ₂ b	2.84	-10.12	实测
22	NP44	泥晶灰岩	J ₂ b	1.8	-8.3	谭富文等,2004	64	BD30-4	粗晶白云岩	J ₂ b	3.38	-10.28	实测
23	NP41	泥晶灰岩	J ₂ b	1.9	-8.6	谭富文等,2004	65	BD30-5	粗晶白云岩	J ₂ b	3.21	-9.8	实测
24	NP38	泥晶灰岩	J ₂ b	1.1	-8.9	谭富文等,2004	66	P11-B4	粗晶白云岩	J ₂ b	3.86	-9.96	实测
25	NP35	泥晶灰岩	J ₂ b	1.7	-8.1	谭富文等,2004	67	P13-B	细晶白云岩	J ₂ b	3.46	-9.79	实测
26	NP32	泥晶灰岩	J ₂ b	1.5	-8.3	谭富文等,2004	68	GP18-Bb	细晶白云岩		4.26	-9.56	实测
27	NP30	泥晶灰岩	J ₂ b	2.3	-8.4	谭富文等,2004	69	GP20-B	粗晶白云岩	J ₂ b	4.41	-8.84	实测
28	5	泥晶灰岩	J ₂ b	1.16	-10.28	张玉修等,2006	70	BD16-B3	细晶白云岩	J ₂ b	3.28	-9.13	实测
29	22	泥晶灰岩	J ₂ b	1.41	-10.24	张玉修等,2006	71	DT-224	粗晶白云岩	J ₂ b	3.6	-7.9	实测
30	4	生屑灰岩	J ₂ b	1.24	-9.7	张玉修等,2006	72	DT-257	细晶白云岩	J ₂ b	2.3	-9.5	实测
31	3	生屑灰岩	J ₂ b	0.86	-12.5	张玉修等,2006	73	DT-282	细晶白云岩	J ₂ b	3.2	-8.9	实测
32	BP-5	泥晶灰岩	J ₂ b	2.17	-9.22	廖忠礼等,2007	74	LE-1	粗晶白云岩	J ₂ b	2.5	-8.7	实测
33	BP-6	内碎屑灰岩	J ₂ b	0.1	-12.7	廖忠礼等,2007	75	LE-2	中晶白云岩	J ₂ b	2.4	-10.6	实测
34	BP-7	泥晶灰岩	J ₂ b	0.33	-12.64	廖忠礼等,2007	76	BG-10	粗晶白云岩	J ₂ b	3.3	-8.1	实测
35	BP-9	内碎屑灰岩	J ₂ b	1.69	-10.69	廖忠礼等,2007	77	GL01-27	粗晶白云岩	J ₂ b	3.1	-10	实测
36	BP-10	球粒灰岩	J ₂ b	1.89	-9.19	廖忠礼等,2007	78	GL01-33	粗晶白云岩	J ₂ b	3.1	-10.4	实测
37	BP-11	内碎屑灰岩	J ₂ b	1.8	-10.68	廖忠礼等,2007	79	GL01-21	粗晶白云岩	J ₂ b	3.1	-10.1	实测
38	BP-16	内碎屑灰岩	J ₂ b	1.44	-10.83	廖忠礼等,2007	80	BP-14	纹层白云岩	J ₂ b	3.75	-9.07	实测
39	BP-17	内碎屑灰岩	J ₂ b	0.96	-10.97	廖忠礼等,2007	81	格鲁关那	鞍形白云石	J ₂ b	4.29	-10.02	实测
40	BP-19	纹层状灰岩	J ₂ b	1.2	-8.74	廖忠礼等,2007	82	格鲁关那	鞍形白云石	J ₂ b	3.36	-10.65	实测
41	ZRP-2	粒屑灰岩	J ₂ b	0.72	-8.77	廖忠礼等,2007	83	格鲁关那	鞍形白云石	J ₂ b	3.49	-10.31	实测
42	D3	生屑灰岩	J ₂ b	2.38	-10.88	廖忠礼等,2007	84	德如日	鞍形白云石	J ₂ b	3.22	-7.51	实测

体系达到碳、氧平衡这一假设条件,然后通过 $MgCa(CO_3)_2 - CO_2$ 和 $MgCa(CO_3)_2 - H_2O$ 平衡分馏方程计算白云岩化流体 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 和 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值(刘德良等,2007)。

本文分别采用 Ohmoto 提出的 Dol (m)— $CO_2(g)$ 、 $HCO_3(L) - CO_2(g)$ 分馏方程(Ohmoto et al., 1997)和 Matthews 建立的氧同位素分馏方程

(Matthews et al., 1977)

$$1000 \ln \alpha [MgCa(CO_3)_2 - H_2O] = \\ 3.06 \times 10^6 T^{-2} - 3.24$$

来计算羌塘盆地布曲组白云岩包裹体 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 和 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值。包裹体均一温度显示,白云岩化温度主要区间是 100~200°C,可以分别建立 100°C 和 200°C 白云岩同位素和白云岩化流体同位素关系,如

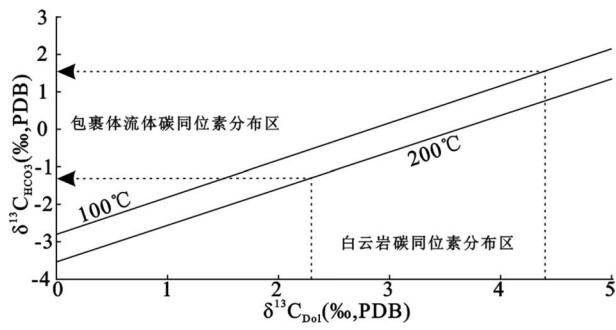


图 7 羌塘盆地白云石—包裹体流体碳同位素关系图

Fig. 7 Diagram showing the flow of inclusions carbon isotope for dolostone in the Qiangtang Basin

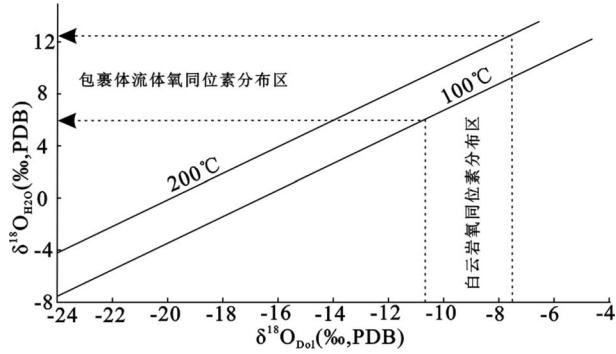


图 8 羌塘盆地白云石—包裹体流体氧同位素关系图

Fig. 8 Diagram showing the flow of inclusions oxygen isotope for dolostone in the Qiangtang Basin

图 7 和图 8。通过磷酸法获得白云岩碳同位素 $-2.30\text{‰} \sim 4.41\text{‰}$, 氧同位素 $-7.51\text{‰} \sim -10.65\text{‰}$; 利用平衡方程获得流体包裹体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值为 $-1.30\text{‰} \sim 1.53\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $5.81\text{‰} \sim 12.50\text{‰}$ 。

7 讨论

白云岩化机理一直是碳酸盐岩岩石学中颇具争议的问题, 古代地层中存在巨厚的白云岩, 但现代海洋环境并没有观察到白云石沉积, 所以一般认为古代白云岩主要是交代成因的。根据现代一些海湾、潮坪、湖泊和泻湖中次生白云岩化的考察和古代白云岩实例的研究, 目前提出了一系列白云石化模式 (Adams and Rhoads, 1960; Friedman and Sanders, 1967; Siegenthaler and Oeschger, 1971; Badiozamani, 1973; Land et al., 1975; Montanez, 1994)。

在我国, 有众多的学者发现了各类白云石化模式的古代实例。例如, 贵阳附近的早、中三叠世白云岩, 被解释为渗流回流白云石化的产物(梅冥相等, 1997); 华北地台中南部的三山子白云岩被认为混

合水白云石化作用的结果(汤朝阳等, 2006); 李荣等(2008)认为下三叠统飞仙关组白云岩和川滇黔地区白云岩为构造热液成因, 其特点是该区有明显的构造断裂, 断裂带周围可见大量灰岩白云石化。宜昌灯影组白马沱段上部的白云岩普遍被认为是典型的蒸发白云石化作用, 其特点是发育窗格构造, 并常见团块状石膏铸模孔富集(张同钢等, 2004)。目前国内外学者已经注意到埋藏白云岩化和构造热液白云岩化作用的重要性, 甚至国外有些学者将白云岩化分为冷水白云岩化和热水白云岩化作用, 冷水白云岩化作用主要是指白云岩化过程中的孔隙水温度不超过 60°C , 例如经典的蒸发泵模式、回流渗透模式和混合水模式, 而热水白云岩化作用是指白云岩化过程中的孔隙水温度大于 60°C , 沉积物埋藏成岩过程中温度较高的富 Mg^{2+} 孔隙水交代方解石形成白云岩, 包括埋藏白云岩化和构造热液白云岩化。

碳酸盐岩地层热史分析往往采用灰岩裂缝或孔洞方解石充填物中的包裹体均一温度分布峰值代表地层经历的最大古地温来恢复盆地的地温梯度。布曲组方解石均一温度具有多峰态分布特征, 反映方解石可能是记录了不同期次的热史, 捕获了不同期次的包裹体。但结合地层埋藏史, 羌塘盆地布曲组经历最大古地温是 110°C (王成善等, 2001), 证实方解石第二组以 100°C 为主峰的包裹体能够代表和反应地层最大古地温, 而第三组以 145°C 为主峰的包裹体分布与白云石包裹体温度分布重叠, 应该是高温白云石化流体在一定程度上改造了灰岩地层, 部分方解石捕获了高温包裹体, 同样部分白云石保留了少量中低温包裹体。白云石包裹体分布相对集中, 除了少量包裹体以 90°C 中低温为主峰外, 绝大多数白云石包裹体以高温为主, 形成了以 170°C 为峰值的分布形态, 其代表的白云岩化温度远远高于正常地层埋藏地温, 反映白云岩经历了异常高温。羌塘盆地布曲组白云岩普遍认为是成层产出, 常常与灰岩, 尤其是颗粒灰岩、藻灰岩互层产出, 但是包裹体分析表明互层产出的灰岩和白云岩均一温度差性明显。白云岩中白云石包裹体均一温度远大于灰岩中方解石的包裹体均一温度, 说明白云石形成温度远大于方解石受热温度, 这类高温异常分布非常类似于热液矿床, 热液成因矿体往往具有较高温度, 而矿床顶底板普遍具有较低温度, 矿体与蚀变带、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(田康志等, 2019)。布曲组白云岩化模式跟热液矿床

具有相似性,即异常高温流体通过断裂向上运移,当遇到布曲组颗粒灰岩时,由于颗粒灰岩孔隙度和渗透率较高,便于热液顺层侧向运移灌入地层,被热液充分充填的孔隙及包裹的方解石颗粒极易被白云岩化,形成白云岩地层。野外产状及宏观岩石学特征表明,布曲组白云岩似层状产出,且与上、下灰岩地层呈渐变或突变接触,同时也可以看到部分白云岩呈火焰状或舌状刺穿灰岩地层,此外也常见白云岩分布在构造破碎带或沿断裂两侧分布,白云岩地层中网格状方解石脉非常发育(季长军等,2019a)。无论是何种产出状态的白云岩地层皆发育于碳酸盐岩台地颗粒滩相,均有不同程度的保留有未被交代尽的原灰岩团块、透镜体及不规则层状残余体,且白云岩薄片镜下普遍存在藻团块、壳体、鲕粒等残余或幻影结构,指示白云岩化交代成因(季长军等,2016;夏国清等,2017)。羌塘盆地侏罗纪沉积后发生了燕山期和喜马拉雅期两次构造活动,形成系列大规模逆冲推覆构造(雷振宇等,2001;刘池洋等,2002,Wu Zhenhan et al., 2004, 2013a, b, 2015;吴珍汉等,2019;季长军等,2019a),昂达尔错—隆鄂尼古油藏便是逆冲推覆至地表破坏形成的(吴珍汉等,2016;季长军等,2019b;赵珍等,2019),大规模逆冲推覆构造为深部热液活动提供了动力学背景和向上运移的通道,构造热液沿断层进入颗粒灰岩地层中,改造颗粒灰岩白云岩化的过程也形成了系列指示热液白云岩化背景的中高温岩矿标志,如雾心亮边白云石、鞍状白云石、片钠铝石、文石、铁白云石等(伊海生等,2014;梁定勇,2014;张帅等,2016a, b;季长军等,2019a)。

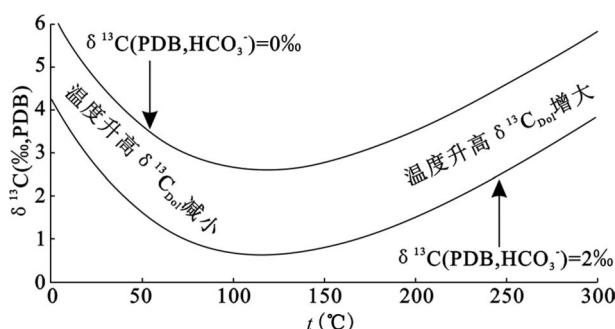


图 9 羌塘盆地热水体系白云石碳同位素分馏曲线

Fig. 9 Fractionation curve of carbon isotope for dolostone in hot water system in the Qiangtang Basin

碳酸盐岩包括石灰岩和白云岩两大类,其碳—氧同位素信号可以反应白云岩化流体的性质,常常

作为一种有效手段来判别白云岩成因。然而,不同盆地、时代、剖面和岩石类型的白云岩碳—氧同位素判别图解是否具有通用性一直存在争议。因此,本文研究盆地两套主要碳酸盐岩地层,索瓦组灰岩氧同位素明显高于布曲组灰岩,但是两者碳同位素基本一致,此外布曲组白云岩氧同位素整体高于布曲组灰岩氧同位素,这些氧同位素分布特征符合其分馏机制和分馏方程,同时也验证碳、氧同位素作为判别白云岩成因的有效性。与灰岩地层相比,羌塘盆地布曲组白云岩以重碳同位素异常富集为特征,白云岩重碳同位素是由碳同位素分馏机制决定的,随着温度的升高,白云石碳同位素会先减小后增加,具体表现为温度低于 125℃,热液流体沉淀或交代的白云石碳同位素随温度增加而减小,然而当温度高于 125℃,白云石碳同位素随温度增加而增加(Horita, 2014)(图 9)。因此,布曲组白云岩重碳同位素特征是典型热液白云岩化的同位素标志。白云岩包裹体测温显示白云岩化作用发生在 100~200℃之间,通过碳—氧同位素计算表明,白云岩化流体碳、氧同位素分别分布在 -1.30‰~1.53‰ 和 5.81‰~12.50‰ 之间,这一值域范围大于海水和淡水 $\delta^{18}\text{O}$ 的范围,也高于现今四川盆地、塔里木盆地油田水的氧同位素值,而与柴达木盆地古近系—新近系高矿化度的油田卤水分布范围(7.68‰~10.58‰)接近。现代海洋表层海水 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 1.5‰,地下水 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值 -7.5‰,而一般盐湖水 $\delta^{13}\text{C}$ 可达 4‰。综合分析研究区白云岩化流体性质可能与高盐度的卤水类似。

8 结论

(1) 方解石和白云石包裹体温度分布区间皆为 50~220℃,但白云石的包裹体温度峰值分布区间明显要高于方解石的峰值温度,多数样品的温度集中在 150℃ 到 220℃ 区间,白云石的高温分布区与方解石的低温分布区明显的对比反映出白云岩化经历了异常高温,远远高于互层灰岩地层,具有类似热液矿床的典型温度场分布特征。

(2) 布曲组地层中,白云岩相对与灰岩具有明显的重碳同位素异常富集特征,该特征可以作为高温流体交代改造方解石的同位素标志。羌塘盆地布曲组白云岩就是高温流体沿断裂向上运移,优先选择布曲组颗粒灰岩顺层运移交代的产物,高温流体与方解石水岩反应,使得白云石具有重碳同位素特征。

(3) 以包裹体均一温度作为白云岩化温度, 依据白云石分馏方程, 采用包裹体宿主矿物白云岩碳、氧同位素计算获得白云岩化流体碳、氧同位素分别为 $-1.30\text{‰} \sim 1.53\text{‰}$ 和 $5.81\text{‰} \sim 12.50\text{‰}$, 具有高盐度卤水碳、氧同位素组成特征。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 白国平. 2006. 世界碳酸盐岩大油气田分布特征. 古地理学报, 8(2): 241~250.
- 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. 沉积与特提斯地质, 26(2): 42~46.
- 冯乔, 马硕鹏, 樊爱萍. 2006. 鄂尔多斯盆地上古生界储层流体包裹体特征及其地质意义. 石油与天然气地质, 27(1): 27~32.
- 黄理力, 林畅松, 郑剑锋, 王晓丽, 张天付. 2020. 塔里木盆地寒武系岩溶型白云岩储层特征及成因分析. 地质论评, 66(S01): 101~103.
- 季长军. 2015. 南羌塘坳陷油藏带生物标志化合物特征及油源对比研究. 导师: 伊海生. 成都: 成都理工大学博士论文: 1~139.
- 季长军, 伊海生, 夏国清, 谢拓, 尹青, 李启来, 金峰. 2016. 羌塘盆地油藏带特征及勘探意义. 地质科技情报, 35(1): 74~79.
- 季长军. 2017. 羌塘盆地古油藏剖析及其有利保存区域预测. 导师: 吴珍汉. 北京: 中国地质科学院博士后研究工作报告: 1~166.
- 季长军, 吴珍汉, 伊海生, 刘志伟, 夏国清, 唐友军, 赵珍. 2019a. 羌塘盆地古油藏及其成藏系统研究. 北京: 地质出版社: 1~230.
- 季长军, 吴珍汉, 刘志伟, 赵珍. 2019b. 羌塘盆地逆冲推覆构造特征及油气资源效应. 地质力学学报, 25(S1): 66~71.
- 金峰. 2017. 藏北羌塘盆地双湖地区中侏罗统布曲组白云岩储层特征研究. 导师: 伊海生. 成都: 成都理工大学硕士论文: 1~67.
- 李荣, 焦养泉, 吴立群, 荣辉, 王瑞. 2008. 构造热液白云石化——一种国际碳酸盐岩领域的新模式. 地质科技情报, 27(3): 35~40.
- 赖锦, 刘秉昌, 冯庆付, 庞小娇, 赵太平, 王贵文, 王抒忧, 陈晶. 2020. 鄂尔多斯盆地靖边气田马家沟组五段白云岩沉积微相测井识别与评价. 地质学报, 94(5): 1551~1567.
- 雷亚军, 强子同, 文应初. 1994. 川东及邻区上二叠统生物礁的白云岩化. 地质论评, 40(6): 534~543.
- 雷振宇, 李永铁, 刘忠, 鲁兵. 2001. 藏北羌塘盆地构造变形及其力学背景. 地质论评, 47(4): 415~419.
- 李明隆, 谭秀成, 苏成鹏, 芦飞凡, 张本健, 潘政屹, 肖笛. 2020. 四川盆地西北部中二叠统栖霞组砂糖状白云岩特征及成因机制——以广元上寺剖面为例. 地质论评, 66(3): 591~610.
- 刘池洋, 杨兴科, 魏永佩, 任战利, 赖绍聪, 陈刚, 郑孟林, 赵政章, 叶和飞, 李永铁, 李庆春. 2002. 藏北羌塘盆地西部查桑地区结构及构造特征. 地质论评, 48(6): 593~602.
- 刘德良, 孙先如, 李振生, 唐南安, 谈迎. 2007. 鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩脉流体包裹体碳氧同位素分析. 石油学报, 28(03): 68~74+79.
- 李鑫, 伊海生, 金峰, 季长军, 李望宇. 2018. 羌塘盆地隆鄂尼—昂达尔错古油藏带白云岩成岩特征. 成都理工大学学报(自然科学版), 45(2): 142~153.
- 廖忠礼, 刘建清, 陈文彬. 2007. 羌塘盆地扎仁区块 1:5 万石油地质构造详查报告: 151~176
- 梁定勇. 2014. 西藏羌塘盆地南部中侏罗统布曲组白云岩成因及储层特征研究. 导师: 伊海生. 成都: 成都理工大学硕士论文: 1~83.
- 梁文君, 肖传桃, 肖凯, 林婉. 2015. 藏北安多晚侏罗世古环境、古气候与地球化学元素关系研究. 中国地质, 42(4): 1079~1091.
- 刘建清, 陈文斌, 杨平, 陈文西, 付修根. 2008a. 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. 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. 2008b. 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. 沉积学报, 26(1): 28~38.
- 刘建清, 杨平, 陈文彬, 陈文西, 付修根. 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. 地学前缘, 17(1): 311~321.
- 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. 地球学报, 28(3): 253~260.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 2004. 流体包裹体. 北京: 科学出版社: 241~394.
- 梅冥相, 马永生, 周丕康, 苏道辰, 罗光文. 1997. 碳酸盐沉积学导论. 北京: 地震出版社: 1~306.
- 谭富文, 王剑, 王小龙, 杜佰伟. 2004. 羌塘盆地雁石坪地区中—晚侏罗世碳、氧同位素特征与沉积环境分析. 地球学报, 25(2): 119~126.
- 汤朝阳, 王敏, 姚华舟, 段其发, 赵希林. 2006. 白云石化作用及白云岩问题研究述评. 东华理工大学学报(自然科学版), 29(3): 205~210.
- 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. 中国地质, 46(2): 398~406.
- 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. 东北石油大学学报, 41(3): 21~33.
- 王成善, 伊海生, 李勇等. 2001. 西藏羌塘盆地地质演化与油气远景评价. 北京: 地质出版社: 1~237.
- 王大锐. 2000. 油气稳定同位素地球化学. 北京: 石油工业出版社: 1~295.
- 吴珍汉, 刘志伟, 赵珍, 季长军, 叶培盛. 2016. 羌塘盆地隆鄂尼—昂达尔错古油藏逆冲推覆构造隆升. 地质学报, 90(4): 615~627.
- 吴珍汉, 赵珍, 季长军, 刘志伟, 杨艳. 2019. 西藏羌塘逆冲推覆构造及油气资源效应图集. 武汉: 中国地质大学出版社: 1~115.
- 夏国清, 伊海生, 黄华谷, 李军鹏. 2009. 北羌塘盆地中侏罗统布曲组缓坡相及沉积演化. 岩性油气藏, 21(2): 29~34.
- 夏国清, 季长军, 杨伟, 吴驰华, 伊海生, 张帅, 李启来, 李高杰. 2016. 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. 石油学报, 37(10): 1247~1255.
- 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. 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. 成都理工大学学报: 自然科学版, 31(6): 611~615.
- 伊海生, 林金辉, 周恩恩, 李军鹏. 2007. 青藏高原北部新生代湖相碳酸盐岩碳氧同位素特征及古环境意义. 古地理学报, 23(3): 303~312.

- 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. 岩石学报, 30(3): 737~746.
- 赵珍, 吴珍汉, 于俊秋, 吴艳君. 2019. 西藏中部尼玛—荣玛地区逆冲推覆构造特征. 地质学报, 93(8): 1849~1866.
- 张帅. 2016. 西藏措勤盆地上二叠统白云岩成因及储集性研究. 导师: 伊海生. 成都: 成都理工大学博士学位论文: 1~113.
- 张帅, 夏国清, 伊海生, 蔡占虎, 李启来. 2016a. 羌塘盆地南部隆鄂尼地区布曲组鞍形白云石成因. 石油与天然气地质, 37(4): 483~489.
- 张帅, 伊海生, 夏国清, 梁定勇. 2016b. 羌塘盆地南部布曲组含油白云岩中自生文石胶结物的鉴定及其成因探讨. 石油实验地质, 38(6): 772~778.
- 张同钢, 储雪雷, 张锐, 冯连君, 霍卫国. 2004. 扬子地台灯影组碳酸盐岩中的硫和碳同位素记录. 岩石学报, 20(03): 717~724.
- 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. 西南石油学院学报, 27(5): 10~13.
- 张玉修, 李勇, 张开均. 2006. 李亚林西藏羌塘盆地依仓玛地区中上侏罗统碳酸盐岩特征及其环境意义. 中国地质, 33(2): 393~400.
- 朱东亚, 孟庆强, 胡文瑄, 金之钧. 2012. 塔里木盆地深层寒武系地表岩溶型白云岩储层及后期流体改造作用. 地质论评, 58(4): 691~701.
- 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. 古地理学报, 2(4): 30~42.
- 朱同兴. 1999. 从弧后盆地到前陆盆地的沉积演化——以西藏北部羌塘中生代盆地分析为例. 特提斯地质, 23(3): 5~19.
- Adams J E, Rhodes M L. 1960. Dolomitization by seepage refluxion. AAPG Bulletin, 44(12): 1912~1920.
- Badiozamani K. 1973. The dorag dolomitization model——application to the Middle Ordovician of Wisconsin. Journal of Sedimentary Research, 43(4): 965~984.
- Bai Guoping. 2006&. Distribution patterns of giant carbonate fields in the world. Journal of Palaeogeography, 8(2): 241~250.
- Chen Wenbin, Yang Ping, Zhang Yujie, Peng Zhimin. 2006&. Dolostone reservoirs and their genesis in the Zaring oil pool in southern Qiangtang basin. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 26(2): 42~46.
- Feng Qiao, Ma Shuopeng, Fan Aiping. 2006&. Characteristics of fluid inclusions in Upper Paleozoic reservoirs in Ordos basin and their geological significance. Oil & Gas Geology, 27(01): 27~32.
- Friedman G M, Sanders J E. 1967. Origin and occurrence of dolostones. Developments in Sedimentology, 9: 267~348.
- Horita J. 2014. Oxygen and carbon isotope fractionation in the system dolomite—water—CO₂ to elevated temperatures. Geochimica et Cosmochimica Acta, 129(8): 111~124.
- Huang Lili, Lin Changsong, Zheng Jianfeng, Wang Xiaoli, Zhang Tianfu. 2020&. Characteristics and genetic analysis of Cambrian Karst dolomite reservoirs in the Tarim Basin. Geological Review, 66(S01): 101~103.
- Ji Changjun. 2015&. The biomarker characteristics and crude oil types of the oil-bearing dolomite in the Southern Qiangtang Depression, Tibet. Tutor: Yi Haisheng. Chengdu: PhD Thesis of Chengdu University of Technology: 1~139.
- Ji Changjun, Yi Haisheng, Xia Guoqing, Xie Tuo, Yin qing, Li Qilai. 2016&. Characteristics and exploration significance of oil reservoir in Qiangtang Basin. Geological Science and Technology Information, 35(1): 74~79.
- Ji Changjun. 2017&. Dissection of the paleo-petroleum reservoir and its favorable preservation region forecast in the Qiangtang Basin. Tutor: Wu Zhenhan. Beijing: Report of Post-Doc. Research, Chinese Academy of Geological Sciences: 1~167.
- Ji Changjun, Wu Zhenhan, Yi Haisheng, Liu Zhiwei, Xia Guoqing, Tang Youjun, Zhao Zhen. 2019a#. Beijing: Geological Publishing House: 1~230.
- Ji Changjun, Wu Zhenhan, Liu Zhiwei, Zhao Zhen. 2019b&. Structural features of the thrust Nappes in the Qiangtang Basin and hydrocarbon resources effect. Journal of Geomechanics, 25(S1): 66~71.
- Jin Feng. 2017&. Characteristics of dolomite reservoirs in Buqu Formation of Middle Jurassic in Shuanghu area, Qiangtang Basin of northern Tibet. Tutor: Yi Haisheng. Chengdu: Master Thesis of Chengdu University of Technology: 1~67.
- Land L S, Folk R L. 1975. Mg/Ca Ratio and Salinity; Two Controls over Crystallization of Dolomite. AAPG Bulletin, 59(1): 60~68.
- Land L S. 1980. The isotopic and trace element geochemistry of dolomite: The state of the art// Concepts and models of dolomitization. Tulsa: SEPM Special Publication, 28: 87~110.
- Lai Jin, Liu Bingchang, Feng Qingfu, Pang Xiaojiao, Zhao Taiping, Wang Guiwen, Wang Shucheng, Chen Jing. 2020&. Identification and evaluation of dolomite sedimentary microfacies in the fifth member of the majiagou formation, Jingbian gas field, ordos basin. Acta Geographica Sinica, 94(5): 1551~1567.
- Lei Bianjun, Qiang Zitong, Wen Yingchu. 1994&. Dolomitization of the upper Permian organic reef in the eastern Sichuan and adjacent areas. Geological Review, 40(6): 534~543.
- Lei Zhenyu, Li Yongtie, Liu Zhong, Lu Bing. 2001&. Tectonic deformation and dynamic background of the Qiangtang Basin in northern Tibet. Geological Review, 47(4): 415~419.
- Li Minglong, Tan Xiucheng, Su Chengpeng, Lu Feifan, Zhang Benjian, Pan Zhengyi, Xiao Di. 2020&. Characteristics and genetic mechanism of granulocyte dolomites from the Qixia formation of middle Permian, northwest Sichuan Basin: a case study of the Guangyuan Shangsi section. Geological Review, 66(3): 561~610.
- Liu Chi yang, Yang Xingke, Wei Yongpei, Ren Zhanli, Lai Shaocong, Chen Gang, Zheng Menglin, Zhao Zhengzhang, Ye Hefei, Li Yongtie, Li Qingchun. 2002&. Structure and structural characteristics of the Chasan area in the western Qiangtang Basin, northern Tibet. Geological Review, 48(6): 593~602.
- Liu Deliang, Sun Xianru, Li Zhensheng, Tang Nan, Tan Ying. 2007&. Carbon and oxygen isotope analysis of fluid inclusions in Ordovician carbonate veins of Ordos Basin. Acta Petrolei Sinica, 28(3): 68~74+79.
- Li Rong, Jiao Yangquan, Wu Liquan, Rong Hui, Wang Rui. 2008&. Structurally controlled hydrothermal dolomitization: a new model international carbonates field. Geological Science and Technology Information, 27(3): 35~40.
- Li Xin, Yi Haisheng, Jin Feng, Ji Changjun, Li Kunyu. 2018&. Diagenetic characteristics of dolomite in the Longeni—Angdarecuo ancient reservoir, Qiangtang Basin, China. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 45(2): 142~153.
- Liao Zhongli, Liu Jianqing, Chen Wenbin. 2007#. The bulletin of petroleum geological mapping (1: 50000) in Zaring region, Northern Tibetan Qiangtang Basin: 151~176.
- Liang Dingyong. 2014&. Study on the Genesis and Reservoir

- Characteristics of Dolomites in Buqu Formation of Middle Jurassic in South Qiangtang Basin of Tibet. Tutor: Yi Haisheng. Chengdu: Master Thesis of Chengdu University of Technology; 1~83.
- Liang Wenjun, Xiao Chuantao, Xiao Kai, Lin Wan. 2015&. The relationship of late Jurassic paleoenvironment and paleoclimate with geochemical elements in Amdo Country of northern Tibet. *Geology in China*, 42(4): 1079~1091.
- Liu Jianqing, Chen Wenbin, Yang Ping, Chen Wenxi, Fu Xiugeng. 2008a&. The Longeni—Anglanco paleo-oil dolomite geochemical characteristics in southern part of the central uplift zone of Qiangtang Basin and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (6): 1379~1389.
- Liu Jianqing, Jia Baojiang, Yang Ping, Chen Wenxi, Fu Xiugeng. 2008b&. 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. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(1): 28~38.
- Liu Jianqing, Jia Baojiang, Yang Ping, Chen Yulu, Peng Bo, Li Zhenjiang. 2007&. The application of carbon, oxygen and strontium isotopes to the study of Middle—Upper Jurassic sequence stratigraphy in Longweicuo area, Qiangtang Basin. *Acta Geoscientica Sinica*, 28(3): 253~260.
- Liu Jianqing, Yang Ping, Chen Wenbin, Chen Wenxi, Fu Xiugeng. 2010&. The characteristics of Longeni—Angdaercuo paleo-oil dolomite in southern part of the central uplift zone of Qiangtang Basin and its forming mechanism. *Earth Science Frontiers*, 17(1): 311~321.
- Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, Ou Guangxi, Shen Kun, Zhang Wenhui. 2004. Fluid inclusion. Beijing : Science Press: 241~394.
- Matthews A, Katz A. 1977. Oxygen isotope fractionation during the dolomitization of calcium carbonate. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41(10): 1431~1438.
- Mei Mingxiang, Ma Yongsheng, Zhou Peikang, Su Daichen, Luo Guangwen. 1997 #. Introduction to carbonate sedimentation. Beijing: Seismological Press; 1~306.
- Milliken K L, Land L S, Loucks R G. 1981. History of burial diagenesis determined from isotopic geochemistry, Frio Formation, Brazoria county, Texas. *AAPG Bulletin*, 65(8): 1397~1413.
- Montanez I P. 1994. Late diagenetic dolomitization of Lower Ordovician, upper Knox carbonates: A record of the hydrodynamic evolution of the southern Appalachian Basin. *AAPG bulletin*, 78(8): 1210~1239.
- Ohmoto H, Goldhaber M. 1997. Sulfur and Carbon Isotopes// *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York: John Wiley & Sons, 517~612.
- Siegenthaler U, Oeschger H. 1980. Correlation of ^{18}O in precipitation with temperature and altitude. *Nature*, 285(5763): 314~317.
- Tan Fuwen, Wang Jian, Wang Xiaolong, Du Baiwei. 2004&. Analysis of carbon and oxygen isotope composition and sedimentary of the Yanshiping area of the Qiangtang Basin in Middle—Late Jurassic. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(2): 119~126.
- Tang Zhaoyang, Wang Min, Yao Huazhou, Duan Qifa, Zhao Xiling. 2010&. Current topics about dolomitization and the problem of dolostones. *Journal of East China Institute of Technology*, 29(3): 205~210.
- 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. *Geology in China*, 46(2): 398~406.
- Vasconcelos C, Mckenzie J A, Warthmann R, Bernasconi S M. 2005. Calibration of the $\delta^{18}\text{O}$ paleothermometer for dolomite precipitated in microbial cultures and natural environments. *Geology*, 33(4): 317~320.
- Wan Youli, Wang Jian, Tan Fuwen, Fu Xiugeng, Wang Zhongwei. 2017&. Dolomite reservoir formation mechanism and evolution feature of the Buqu formation in the Longeni—Angdaercuo area, Qiangtang basin. *Journal of Northeast Petroleum University*, 41(3): 21~33.
- Wang Chengshan, Yi Haisheng, Li Yong et al. 2001&. *The Geological Evolution and Prospective Assessment for Oil and Gas in the Qiangtang Basin, Tibet*. Beijing: Geological Publishing House: 1~23.
- Wang Darui. 2000#. *Stable Isotope Geochemistry of Petroleum*. Beijing: Petroleum Industry Press: 1~295.
- Wu Zhenhan, Hu Daogong, Ye Peisheng, Zhao Xun, Liu Qisheng. 2004. Thrusting of the north Lhasa Block in the Tibetan plateau. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 246~259.
- Wu Zhenhan, Hu Daogong, Ye Peisheng, Wu Zhonghai. 2013a. Early Cenozoic tectonics of the Tibetan plateau. *Acta Geologica Sinica*, 87(2): 289~303.
- Wu Zhenhan, Ye Peisheng, Barosh P J, Hu Daogong, Lu Lu. 2013b. Early Cenozoic multiple thrusts in the Tibetan plateau. *Journal of Geological Research*: 1~12.
- Wu Zhenhan, Patrick J. Barosh, Ye Peisheng, Hu Daogong. 2015. Late Cretaceous tectonic framework of the Tibetan plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114: 693~703.
- Wu Zhenhan, Liu Zhiwei, Zhao Zhen, Ji Changjun, Ye Peisheng. 2016&. Thrust and uplift of the Lung, Erni—Angdarco paleo-oil reservoirs in the Qiangtang Basin. *Acta Geologica Sinica*, 90(4): 615~627.
- Wu Zhenhan, Zhao Zhen, Ji Changjun, Liu Zhiwei, Yang Yan. 2019. *Atlas Of Nappe Structure and Its Effect to Periferous Sequence in Central Qiangtang Block, Northern Tibet*. Wu Han: China University Of Geosciences Press: 1~115.
- Xia Guoqing, Yi Haisheng, Huang Huagu, Li Junpeng. 2009&. Carbonate ramp facies and sedimentary evolution of Middle Jurassic Buqu Formation in northern Qiangtang Basin. *Lithologic Reservoirs*, 21(2): 29~34.
- Xia Guoqing, Ji Changjun, Yang Wei, Wu Chihua, Yi Haisheng, Zhang Shuai, Li Qilai, Li Gaojie. 2016&. Fluid inclusion characteristics and hydrocarbon charging history of oil reservoir belt in the Mid-Jurassic Buqu Formation, Southern Qiangtang Depression. *Acta Petrolei Sinica*, 37(10): 1247~1255.
- 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. *Lithologic Reservoirs*, 29(1): 90~96.
- 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 implication. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 31(6): 611~615.
- Yi Haisheng, Lin Jinhui, Zhou Kenken, Li Junpeng. 2007&. Carbon and oxygen isotope characteristics and palaeoenvironmental implication of the cenozoic lacustrine carbonate rocks in northern

- Qinghai—Tibetan Plateau. *Journal of Palaeogeography*, 23(3): 303~312.
- Yi Haisheng, Chen Zhiyong, Ji Changjun, Yang Xiaoping, Xia Guoqing, Wu Chihua. 2014&. New evidence for deep burial origin of sucrosic dolomites from Middle Jurassic Buqu Formation in southern Qiangtang Basin. *Acta Petmlogica Sinica*, 30(3): 737~746.
- Zhang Shuai. 2016&. Origin and reservoir characteristics of dolomite of The Upper Permian in Coqen basin, Tibet. Tutor: Yi Haisheng. Chengdu: PhD Thesis of Chengdu University of Technology: 1~113.
- Zhang Shuai, Xia Guoqing, Yi Haisheng, Cai Zhanhu, Li Qilai. 2016a&. Origin of saddle dolomites from the Buqu Formation of Longeni area in southern Qiangtang Basin. *Oil & Gas Geology*, 37(4): 483~489.
- Zhang Shuai, Yi Haisheng, Xia Guoqing, Liang Dingyong. 2016b&. Mineral and genesis study of authigenic aragonite in sucrosic dolomites from Middle Jurassic Buqu Formation in southern Qiangtang Basin, Tibet. *Petroleum Geology & Experiment*, 38(6): 772~77.
- Zhang Tonggang, Chu Xuelei, Zheng Qirui, Fang Lianjun, Huo Weiguo. 2004&. The sulfur and carbon isotopic records in carbonates of the Dengying Formation in the Yangtze Platform, China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 717~724.
- Zhang Xiaoqing, Yi Haisheng, Zhu Yingtang. 2005&. Study on reservoir characteristics of the dolomite in the Shuanghu area, Qiangtang Basin. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 27(5): 10~13.
- Zhu Jingquan, Li Yongtie. 2000&. Types, origin and reservoir characteristics of the Jurassic dolostones in the Qiangtang Basin, North Tibet. *Journal of Palaeogeography*, 2(4): 30~42.
- Zhang Yuxiu, Li Yong, Zhang Kaijun. 2006&. Characteristics of Mid—Upper Jurassic Carbonate rocks in the Yichangma area, Qiangtang Basin, Tibet: Implications for the sedimentary environment. *Geology in China*, 33(2): 393~400.
- Zhao Zhen, Wu Zhenhan, Yu Junqiu, Wu Yanjun. 2019&. Features of thrust Nappe structure in Nima—Rongma area, central Xizang. *Acta Geographica Sinica*, 93(8): 1849~1866.
- Zhao Zhengzhang. 2000. Conditions of petroleum geology of the Qiangtang Basin of the Qinghai—Tibet Plateau. *Acta Geologica Sinica*(English edition), 74(3): 661~665.
- Zhu Dongya, Meng Qingqiang, Hu Wenxuan, Jin Zhijun. 2012&. Deep Cambrian surface karst-type dolomite reservoir and its late fluid transformation in the Tarim basin. *Geological Review*, 58(4): 691~701.
- Zhu Tongxing. 1999&. Sedimentary evolution from back-arc to foreland basin: an example from the Qiangtang Mesozoic Basin in Northern Xizang. *Tethys Geology*, 23(3): 303~312.

Carbon and oxygen isotopes analysis of the fluid inclusions in Middle Jurassic saccharoidal dolostone of Qiangtang Basin and discussion on the genesis of dolostone

JI Changjun^{1,2,3)}, CHEN Cheng¹⁾, WU Zhenhan⁴⁾, YI Haisheng⁵⁾, XIA Guoqing⁵⁾, ZHAO Zhen⁴⁾

1) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081;

2) Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction, Ministry of Natural Resources, Beijing, 100081;

3) Key Laboratory of Shale Oil and Gas Geological Survey, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081;

4) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;

5) Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059

Objectives: As a potential strategic reserve base for oil and gas exploration in the Qiangtang Basin, the discovery of the Longeni—Angdar Co paleoreservoir marked a new climax of the oil and gas exploration. The genesis of dolostone and its reservoir prediction are critical to the exploration of carbonate reservoirs in this case. However, the genesis of the saccharoidal dolostone reservoir has been under debate and attracted much attention, and there is no unified understanding of the genesis of dolostone in Buqu Formation in Qiangtang Basin, and the argument mainly focuses on the dolomitic fluid properties. This paper discusses the genesis of dolostone through geochemical characteristics and dolomitic fluid properties.

Methods: In addition to the analysis of the temperature and salinity of the fluid inclusions, the values of carbon and oxygen isotope in fluid inclusions of Jurassic saccharoidal dolostone of Qiangtang Basin were calculated by the isotopic fractionation equation, and the dolomitization fluid characteristics of the Jurassic saccharoidal dolostone in the Qiangtang Basin are discussed.

Results: The temperature of the dolostone and limestone inclusions ranges from 50 to 220°C. The temperature of dolomite inclusions is significantly higher than that of calcite vein, and most samples are concentrated 150~220°C. In addition, compared with the limestone within the same layer, dolostone is more enriched in heavier

carbon isotopes, which is a sign of high-temperature fluid—rock reaction. The carbon and oxygen isotopes of the dolomite inclusions were calculated by the carbon and oxygen isotopes fractionation equation, which were between $-1.30\text{‰} \sim 1.53\text{‰}$ and $5.81\text{‰} \sim 12.50\text{‰}$ respectively, potentially results of high salinity brine.

Conclusions: This study integrates comprehensive temperature, salinity and carbon—oxygen isotope analysis of inclusions, reveals that the saccharoidal dolostone of Buqu Formation in Qiangtang Basin is hydrothermal metasomatic origin.

Keywords: inclusions; carbon and oxygen isotopes; dolostone genesis; ancient oil reservoirs; hydrothermal metasomatism origin; Qiangtang Basin; Tibet

Acknowledgements: This research was supported by the China Geological Survey (No. DD20160161)

First author: JI Changjun, male, research assistant, mainly working on Sedimentary Geology and Petroleum Geology; Email: jichangjun2007@sina.com

Manuscript received on: 2020-07-08; Accepted on: 2020-08-11; Edited by: LIU Zhiqiang

Doi: 10.16509/j.georeview.2020.05.008

《地质学报》(英文版)评选出 2019 年度优秀论文

《地质学报》(英文版)是中国最早的一本地学期刊,随着中国地质学会的成立而诞生,至今已走过 99 个年头,是我国最著名的地学刊物之一,在国际上亦有很高声誉,多年来一直被“SCI”收录,连续 8 年获得中国知网等评出的“中国最具国际影响力科技期刊”称号(即依据被“SCI”统计源期刊引用数据,按一定公式计算,位居中国科技期刊的前 5%)。

在中国科协等“登峰计划”项目和“卓越计划”项目的支持下,中国地质学会评选了《地质学报》(英文版)2019 年度优秀论文。

本次评选,主要由《地质学报》(英文版)编辑部负责探索试行。为了得到文章发表后的准确的学术影响情况,本次评选的论文限于 2016 年第 1 期至 2018 年第 6 期刊出的文章。文章形式以 Article 为主,兼顾少量 Review; 消息报道等短文不在评选范围,所有增刊也不参与评选。

编辑部查阅了上述评选范围内各篇文稿第一作者和通讯作者的学术背景、学术能力及学术道德,文章在 SCI 和 CNKI 系统中的被引用情况,文稿投稿时的专家评审意见等内容,经综合评判,并注意兼顾不同单位和不同专业,得出初步候选文章,经主编、副主编和学会秘书长审定,最终评选出 15 篇文章为优秀论文。

附:《地质学报》英文版 2019 年度获奖优秀论文名单

(以第一作者姓名汉语拼音字母为序)

范洪海等. 北京铀矿地质研究院. Genesis and Uranium Sources of Leucogranite-hosted Uranium Deposits in the Gaudeamus Area, Central Damara Belt, Namibia: Study of Element and Nd Isotope Geochemistry. 2017, 91(6):2126~2137.

李勇等. 成都理工大学. The Coupling Relationship between the Uplift of Longmen Shan and the Subsidence of Foreland Basin, Sichuan, China. 2017, 91(2):379~395.

刘财. 吉林大学. The Identification and Modeling of the Volcanic Weathering Crust in the Yingcheng Formation of the Xujiawizi Fault Depression, Songliao Basin. 2017, 91(4):1339~1351.

冉博、刘树根等. 成都理工大学. Reservoir Characteristics and Preservation Conditions of Longmaxi Shale in the Upper Yangtze

Block, South China. 2016, 90(6):2182~2205.

万渝生等. 中国地质科学院地质研究所. Eastern Ancient Terrane of the North China Craton. 2016, 90(4):1082~1096.

王贵玲等. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所. Research on Formation Mechanisms of Hot Dry Rock Resources in China. 2016, 90(4):1418~1433.

王河锦等. 北京大学. Very Low-Grade Metamorphism of Clastic Rocks from the Meso—Neoproterozoic and the Paleozoic along the Profile Yueyang—Linxiang in Northeastern Hunan Province and Its Geological Implications. 2016, 90(5):1743~1753.

吴珍汉等. 中国地质科学院. Early Cretaceous Tectonics and Evolution of the Tibetan Plateau. 2016, 90(3):847~857.

熊发挥,杨经绥等. 中国地质科学院地质研究所. Diamonds and Other Exotic Minerals Recovered from Peridotites of the Dangqiong Ophiolite, Western Yarlung-Zangbo Suture Zone, Tibet. 2016, 90(2):425~439.

徐星等. 中国科学院古脊椎与古人类研究所. An Updated Review of the Middle—Late Jurassic Yanliao Biota: Chronology, Taphonomy, Paleontology and Paleoecology. 2016, 90(6):2229~2243.

杨文采等. 浙江大学. Discovering Crustal Deformation Bands by Processing Regional Gravity Field. 2016, 90(1):66~74.

张国伟,李三忠等. 西北大学、海洋大学. West Pacific and North Indian Ocean Seafloor and Their Ocean—Continent Connection Zones: Evolution and Debates. 2017, 91(6):2126~2137.

张永双等. 中国地质调查局天津地质调查中心. Late-Quaternary Slip Rate and Seismic Activity of the Xianshuihe Fault Zone in Southwest China. 2016, 90(2):525~536.

张岳桥等. 南京大学. Neotectonics of the Eastern Margin of the Tibetan Plateau: New Geological Evidence for the Change from Early Pleistocene Transpression to Late Pleistocene—Holocene Strike-slip Faulting. 2016, 90(2):467~485.

邹才能等. 中石油石油勘探开发研究院. Geological and Geochemical Characteristics and Exploration Prospect of Coal-Derived Tight Sandstone Gas in China: Case Study of the Ordos, Sichuan, and Tarim Basins. 2018, 92(4):1609~1626.

2019's excellent papers of *Acta Geologica Sinica* (English edition) selected