

The Geochemical Characteristics of Stable Carbon and Oxygen Isotope and Analysis of Diagenetic Environment

—A Case Study of Upper Permian Changxing Formation Dolostone in Northeast of Sichuan

Wendong Liu¹, Zhonggui Hu^{1,2*}, Wei Zhang¹, Peng Qin^{1,2}, Jie Han¹,
Youhao Zhang¹, Yan Yang¹

¹Earth Science Institute, Yangtze University, Wuhan Hubei

²Sedimentary Basin Research Center, Yangtze University, Wuhan Hubei

Email: *hgz1978@yangtzeu.edu.cn

Received: Dec. 18th, 2016; accepted: Feb. 16th, 2017; published: Jun. 15th, 2017

Abstract

The dolostones in Changxing Formation of the Upper Permian in the northeastern Sichuan Basin is an important high quality reservoir. In recent years, the diagenetic environment or cause of dolostones in Changxing Formation has become a hot topic for researchers to discuss. Based on the analysis of petrology and stable isotopes of carbon and oxygen, this paper comprehensively studies the formation mechanism of dolostone of Changxing Formation. The results of study show that dolomitization has multi-period characteristic. According to the analyses of diagenetic environment, the dolostones have been divided into penecontemporaneous dolostone related to evaporation environment and the early, middle and late diagenetic dolostone in the burial environment. The diagenetic stages have been further divided into early, middle and late diagenetic stage. Combined with analysis results of carbon and oxygen isotope, it indicates that the late diagenetic stage dolostone is the result of hydrothermal dolomitization.

Keywords

Carbon and Oxygen Isotope, Dolostone, Changxing Formation of Upper Permian, Dolomitization

*通信作者。

稳定碳、氧同位素地球化学特征与成岩环境分析

——以川东北地区上二叠统长兴组白云岩为例

刘文栋¹, 胡忠贵^{1,2*}, 张 玮¹, 秦 鹏^{1,2}, 韩 杰¹, 张友浩¹, 杨 焱¹

¹长江大学地球科学学院, 湖北 武汉

²长江大学沉积盆地研究中心, 湖北 武汉

作者简介: 刘文栋(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事资源勘查方面的学习。

Email: hzg1978@yangtzeu.edu.cn

收稿日期: 2016年12月18日; 录用日期: 2017年2月16日; 发布日期: 2017年6月15日

摘 要

四川盆地东北部上二叠统长兴组白云岩为重要的优质储层, 近年来, 长兴组白云岩成岩环境或成因问题成为研究者讨论的热点话题。在岩石学研究的基础上, 运用稳定碳、氧同位素, 对研究区长兴组白云岩进行综合研究表明, 白云石化具有多期次的特点, 按照成岩环境划分为蒸发环境下的准同生白云岩和埋藏条件下的早、中、晚期成岩白云岩。并划分为早、中、晚成岩阶段, 结合碳、氧同位素分析结果进一步表明晚成岩阶段白云岩是构造热液白云石化的结果。

关键词

碳、氧同位素, 白云岩, 上二叠统长兴组, 白云石化

Copyright © 2017 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在碳酸盐岩的孔隙演化中, 白云石化作用是影响其孔隙发育的重要因素。地质学家在研究白云石化作用时, 对白云岩形成机制做了很多探讨和总结, 白云岩成因问题一直在沉积学界引起广泛关注, 成为延续时间较长的讨论话题。在我国, 白云岩从古生代至新生代都有发育, 尤其是在西部地区, 为白云岩研究提供了良好的地质条件[1]。四川盆地东部近年来成为油气勘探重点地区, 迄今为止, 川东地区碳酸盐岩层位所发育的较好油气储集层大多为颗粒白云岩或生物礁云岩, 其中包括白云石化程度较高的上二叠统长兴组白云岩储层。多期次白云石化作用的叠加, 对长兴组白云岩储层起到了极其重要的控制作用[2]。针对该区白云石化作用多期次性和成因机理的复杂性, 结合白云石化多期次的发育情况, 研究认为泥-微晶白云岩形成机理与蒸发泵作用有关, 即准同生白云石化作用的产物[3], 其余各类白云岩, 如颗粒白云岩、晶粒白云岩和生物礁白云岩皆为多期次埋藏白云石化作用的产物。以前人研究为基础, 笔者拟从地质综合研究角度出发, 以岩石学为基础, 结合研究区构造和沉积相特征, 主要是利用稳定碳、氧

同位素等地球化学测试数据，试对研究区各种类型白云岩进行全面的成岩环境分析，增加对川东北长兴组白云岩形成环境的认识，希望能够为盆地白云岩储层预测提供地球化学上的依据。

2. 区域地质背景

四川盆地已经成为我国重要的天然气富集盆地之一，盆地东北部上广泛发育的碳酸盐岩地层具有巨大的勘探潜力。四川盆地经过复杂的构造演化，不同阶段、不同性质的构造叠加，形成了四川盆地东部具有构造叠加性质的川东弧形褶皱带(图 1)。中二叠世发生的“峨眉地裂运动”，使川东地区形成了张性断块，其原有的古构造基底格局被彻底改变。随后，中二叠世茅口期和龙潭期之间的东吴运动，使四川盆地整体抬升，在川东北地区形成了一个北东向的古斜坡。构造格局的改变，使西部的峨眉山和康滇古陆一带为陆源剥蚀区。自龙潭期，沉积古地理格局自西向东依次为海陆交互相、浅海相和深海相。至长兴期，川东地区便以广阔的碳酸盐台地沉积为主，并伴有深海相“台盆”，即“开江-梁平”海槽和“城口-鄂西”海槽[4]。研究区即位于开江-梁平海槽东段(图 2)，在区域构造上，开江-梁平海槽位于川东弧形褶皱带的东北缘，川东弧形褶皱带的空间展布与形成演化对研究区的构造演化具有极其重要影响，进而控制了该区的沉积[5]。研究区上二叠统长兴组主要为一套海相碳酸盐岩沉积，其中白云岩构成主要的储集岩类。

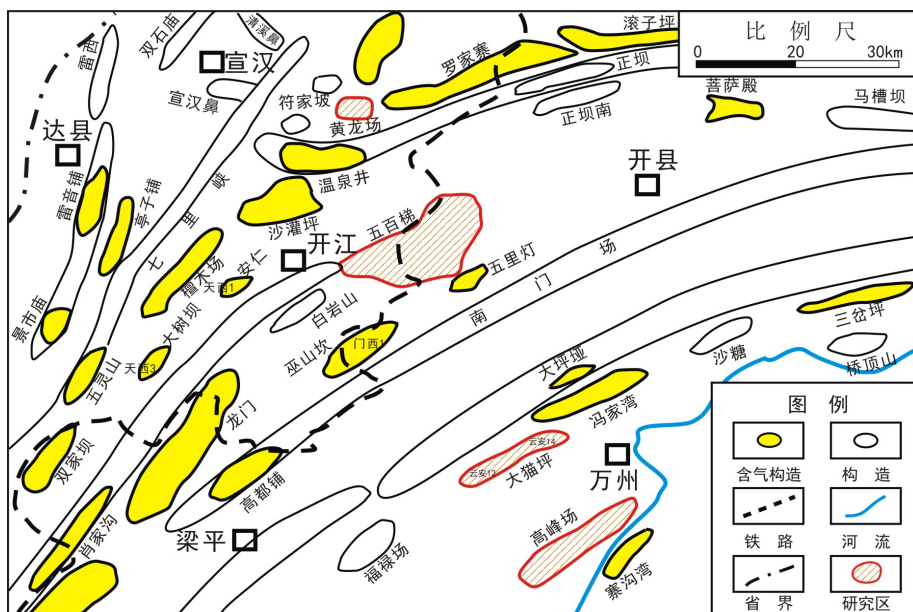


Figure 1. Construction location map of the study area

图 1. 研究区构造位置图

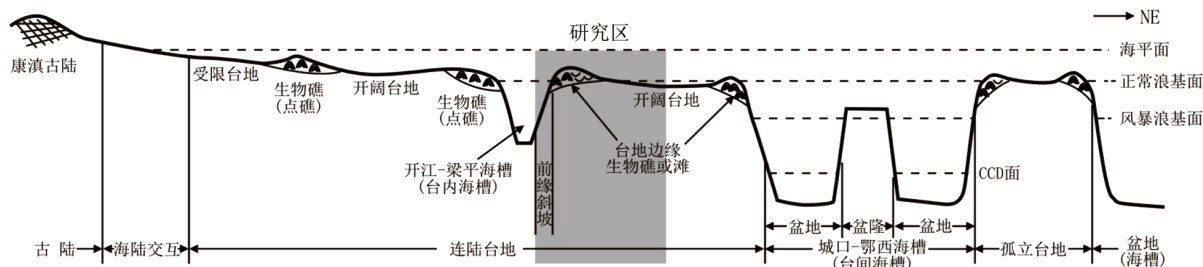


Figure 2. Schematic diagram of tectonic-palaeogeographic pattern of Changxing Formation in the eastern section of Kaijiang-Liangping trench

图 2. 开江-梁平海槽东段长兴组构造-古地理格局示意图

3. 白云岩岩石学特征

四川盆地东北部上二叠统长兴组白云岩分布较为广泛，岩石类型复杂多样。笔者在研究过程中，将原岩沉积特征和白云岩结构特征以及所具有的特殊构造为主要依据，将研究区长兴组白云岩分为泥-微晶白云岩、粉晶白云岩、细晶白云岩、中-粗晶白云岩和构造碎裂化白云岩等 5 种类型，各类型白云岩岩石学特征如下。

3.1. 泥-微晶白云岩

泥-微晶白云岩以具有泥-微晶结构为主要特征，晶体形态以他形为主，晶体之间接触紧密呈镶嵌状(图 3(a))。常具有泥质条带、鸟眼和石膏假晶等潮汐和暴露成因标志。该类白云岩一般认为与准同生白云石化作用有关，即蒸发条件下的潟湖-潮坪环境中，高 Mg/Ca 比的卤水交代灰泥形成。

3.2. 粉晶白云岩

该类白云岩的原始沉积构造保存较为完整，有两种主要岩石类型：灰质粉晶颗粒或礁白云岩(图 3(b))和粉-细晶颗粒或礁白云岩(图 3(c))；颗粒组分以生物碎屑为主，前者晶体形态以半自形为主，少数他形，粉晶结构，白云石的晶面较脏，颗粒和礁结构皆保存较为完好；后者在晶体大小和形态上与前者较为一致，颗粒或生物礁结构少量破坏，且几乎不含残余灰质组分。该类白云岩应与生物碎屑或造礁生物被优先白云石化有关。根据其结构特征，表明该类白云岩为埋藏阶段早期白云石化作用的产物。

3.3. 细晶白云岩

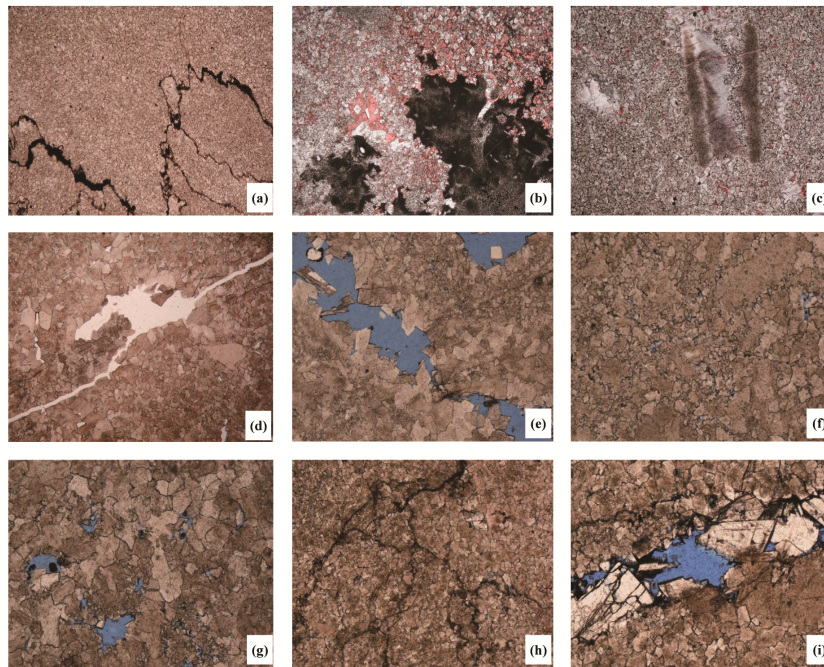
该类白云岩晶体大小在 0.05~0.25 mm 之间，部分为中晶级(0.25~0.5 mm)，白云石晶面较脏，晶形较好，且多见雾心亮边结构，白云石化不均匀并伴有强烈的重结晶作用。在该类白云岩的某些岩石类型中，如具不明显残余结构的粉-细晶颗粒白云岩(图 3(d))或礁白云岩或部分中-细晶白云岩(图 3(e))，礁白云岩中的晶间孔和晶间溶孔十分发育，在较大的溶孔内往往有白云石晶簇分布，除局部充填有少量沥青外，一般不含其他的外来物质，此为深部溶解作用的典型标志，并确定为该类白云岩为埋藏阶段中期白云石化作用形成。

3.4. 中-粗晶白云岩

该类白云岩中晶体大小以中晶级(0.25~0.5 mm)为主，部分为粗晶级(0.5~1.0 mm)，晶形较好，部分白云石具有雾心亮边结构(图 3(f)、图 3(g))。值得注意的是，在粗晶白云石中常见晶体呈马鞍状结构特征。与之相应的是研究区长兴组分布在台内海槽的东段，表明构造活动相伴生的热液流体对长兴组白云岩具有一定影响，该类具马鞍状结构的白云石属于埋藏阶段晚期构造热液活动成因[6] [7] [8]，下文会利用地球化学数据进一步分析论证。

3.5. 构造碎裂化白云岩

该类白云岩以发生构造碎裂化作用为特征(图 3(h)、图 3(i))，伴随有强烈的溶蚀现象，发育呈网状分布的裂缝，导致岩石的原始结构完全消失，溶蚀作用沿裂缝表现较为强烈，孔、洞、缝连通性好并在其内充填有炭质沥青。该类白云岩一般认为是成岩阶段晚期白云岩发生碎裂化作用所导致的。



(a) 泥-微晶白云岩, 发育缝合线构造, PG6 (5-38/101); (b) 细-粉晶灰质白云岩, 岩石颜色深浅不一, 具花斑状构造, 深色斑块为泥晶结构, 浅色斑块为细-粉晶结构, F003-2 (1-16/101); (c) 粉晶白云岩, 粉晶结构, 局部溶孔中充填方解石, F003-2 (1-53/101); (d) 残余生屑粉-细晶白云岩, 具雾心亮边结构, 发育溶缝和溶孔, TD002-11 (3-105/135); (e) 中-细晶角砾状白云岩, 白云石重结晶作用较强, 具斑状构造, 溶缝及溶孔发育, TD10 (2/165); (f) 粗晶残余海绵礁白云岩, 白云石重结晶作用强, 部分白云石具雾心亮边结构, TD10 (5/463); (g) 粗晶残余生屑白云岩, 主体由粗晶白云石组成, 晶间孔发育, TD10 (5/463); (h) 构造碎裂化白云岩, 残余棘屑粉-细晶结构, TD10 (4/332); (i) 构造碎裂化白云岩, 白云石镶嵌接触, 破裂缝内充填有中-粗晶白云石及有机质, TD10 (4/332)。所有照片均为单偏光, 对角线长 3.75mm。

Figure 3. Photomicrographs for familiar dolostones of in Changxing Formation of study area
图 3. 研究区长兴组常见的白云岩类型图谱

4. 碳、氧同位素地球化学特征及成因解释

对研究区上二叠统长兴组多种类型的白云岩样品和灰岩类样品进行了碳、氧同位素分析(表 1), 并对数据结果进行了统计(表 2, 图 4), 分析结果表明:

1) 长兴组白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 分布在 $0\text{‰}\sim 4.581\text{‰}$ (PDB), 仅一个样品为负值(-0.647‰); $\delta^{18}\text{O}$ 分布在 $-7.205\text{‰}\sim -2.979\text{‰}$ (PDB)。

2) 与长兴组海相灰岩类 $\delta^{18}\text{O}$ (为 -5.019‰)相比, 泥-微晶白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ (为 -4.405‰)偏大一些, 较富集重同位素。根据同位素分馏作用原理, 相对较轻的同位素由于蒸发作用散失掉, 而使得重同位素水相相对富集, 这种同位素分馏的动力学原理解释了在蒸发海水环境下形成的泥-微晶白云岩自然要比正常海相灰岩类稳定同位素要偏正一些[9]。结合岩石学特征, 反映了该类白云岩的形成与超浓缩高 Mg/Ca 粒间水或蒸发作用有关。但值得注意的是, 该类白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 平均为 1.979‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 平均为 -4.405‰ , 与理想的准同生白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^{13}\text{C}$ 平均为 2‰ PDB, $\delta^{18}\text{O}$ 平均为 3.8‰ PDB)相比, 该类白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 与理想的准同生白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 十分符合, 同样表明长兴组白云岩碳稳定同位素几乎不受成岩过程改造[10]; 而 $\delta^{18}\text{O}$ 则明显偏负, 这并不影响对该类白云岩的成因解释, 晚二叠世, 研究区较大的一次海退事件, 使台地边缘隆起带暴露并遭到强烈剥蚀, 同期海水中混入了大量陆源淡水, 由此奠定了准同生白云岩的低 $\delta^{18}\text{O}$, 同时反映了该高盐度的白云岩流体来源于上覆下三叠统飞仙关组地层所囚禁准同生海源孔隙水[11]。

3) 除准同生白云岩以外, 其他各类白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 都较海相灰岩类偏负(表 2), 具有典型的埋藏特征。这种比同期海水偏负的现象一般认为是“温度效应”以及准同生白云石在埋藏条件下的“转化作用”所致。准同生白云岩中的欠稳定、有序度低的白云石, 从地表环境进入埋藏环境时, 会经历转化过程,

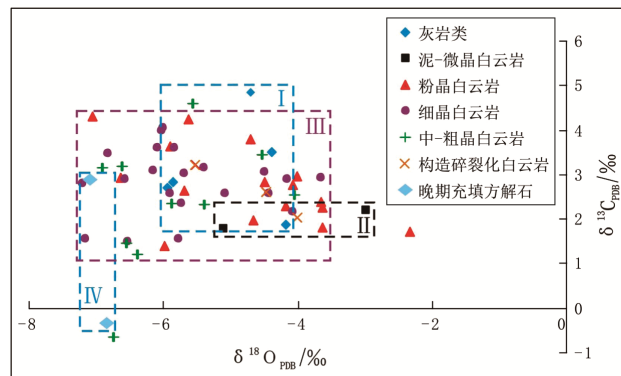
Table 1. Carbon and oxygen isotopic compositions of carbonate samples in Changxing Formation of the study area
表 1. 研究区长兴组碳酸盐岩样品碳、氧同位素组成

岩样类型	样品编号	岩性	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$
灰岩类	DT002-1 (3-3/22)	泥晶灰岩	-4.710	4.847
	F003-2 (4-159/165)	泥 - 微晶生物屑灰岩	-5.947	2.706
	TD10 (13-1687)	微晶生物屑灰岩	-4.183	1.881
	TD53 (4-602/603)	泥晶礁灰岩	-5.857	2.827
	YA1 (4-196)	泥 - 微晶灰岩	-4.396	3.517
泥 - 微晶白云岩	F003-2 (1-16/101)	泥 - 粉晶白云岩	-5.110	1.771
	PG6 (5-38/101)	泥 - 微晶白云岩	-2.979	2.186
	F003-2 (1-53/101)	粉晶白云岩	-3.629	1.827
粉晶白云岩	F003-2 (4-56/165)	残余海绵礁白云岩	-5.989	1.393
	TD021-3 (1-2/83)	细粉晶白云岩	-4.179	2.298
	TD10 (1-6 上)	细粉晶白云岩	-4.651	1.961
	TD10 (2-76)	细粉晶白云岩	-3.664	2.387
	TD10 (2-131)	细粉晶白云岩	-7.056	4.292
	TD10 (7-833)	粗粉晶白云岩	-4.698	3.804
	TD10 (11-1477)	溶孔粉晶白云岩	-5.637	4.230
	TD21 (1-13)	棘皮粉晶白云岩	-6.640	2.916
	TD53 (2-68)	细 - 粉晶残余海绵礁云岩	-5.699	2.638
	HL5 (4-304)	粉晶白云岩	-3.643	2.251
	HL5 (3-211)	粉晶白云岩	-4.503	2.844
	HL5 (2-115)	粉晶白云岩	-5.905	3.648
	F003-2 (4-5/165)	溶孔粉-细晶白云岩	-5.781	1.572
	TD002-11 (3-11/135)	粉 - 细晶白云岩	-5.396	3.155
	TD002-11 (3-105/135)	残余生物屑粉 - 细晶白云岩	-6.570	2.889
细晶白云岩	TD10 (4-356)	溶孔细晶白云岩	-5.688	3.031
	TD10 (3-246)	细晶白云岩	-4.082	2.178
	TD53 (7-953)	残余棘屑粉 - 细晶白云岩	-5.842	3.593
	TD53 (7-959)	粉 - 细晶白云岩	-6.822	3.471
	TD53 (7-995)	细晶白云岩	-6.097	3.609
	TD74 (3-306)	残余棘屑粉 - 细晶白云岩	-5.738	2.369
	TD74 (5-509)	溶孔粉 - 细晶白云岩	-6.525	1.501
	HL4 (1-2)	粉 - 细晶白云岩	-6.016	3.985
	HL5 (1-4)	溶孔细晶白云岩	-5.087	2.566
	HL5 (6-402)	溶孔残余生屑细晶白云岩	-7.205	2.814
	F003-2 (2-28/43)	中晶白云岩	-6.732	-0.647
	TD002-11 (1-29/201)	粗晶残余海绵礁白云岩	-6.558	1.463
	TD10 (5-463)	粗晶残余海绵礁白云岩	-6.913	3.150
	TD10 (11-1435)	残余棘屑细 - 中晶白云岩	-5.561	4.581
	中 - 粗晶白云岩	TD21 (1-228)	溶孔粗晶白云岩	-4.526
TD74 (3-224)		残余生屑中晶白云岩	-5.873	2.359
TD74 (4-442)		残余颗粒中晶白云岩	-5.401	2.337
HL5 (7-443)		粗晶白云岩	-6.611	3.184
TD10 (4-332)		碎裂化残余棘屑粉细晶白云岩	-5.525	3.211
方解石	HL1 (2-35)	溶洞或裂缝充填方解石	-7.089	2.869
	TD002-3 (4396.55)	溶洞或裂缝充填方解石	-6.849	-0.313

Table 2. The analysis results of carbon and oxygen stable isotope of various types of carbonate rocks in Changxing Formation of the study area

表 2. 研究区长兴组各类碳酸盐岩碳、氧稳定同位素分析结果

岩石类型	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$		$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$		样品数/块
	范围	平均值	范围	平均值	
灰岩类	-5.947~-4.183	-5.019	1.881~4.847	3.156	5
泥-微晶白云岩	-5.110~-2.979	-4.405	1.771~2.186	1.979	2
粉晶白云岩	-7.056~-3.629	-5.069	1.393~4.292	2.807	13
细晶白云岩	-7.205~-4.082	-5.911	1.501~3.985	2.826	13
中-粗晶白云岩	-6.913~-4.526	-6.022	-0.647~4.581	2.483	8
构造碎裂化白云岩	-5.525~-5.525	-5.525	3.211~3.211	3.211	1
方解石	-7.089~-6.849	-6.969	-0.313~2.869	1.278	2



I. 海相泥-微晶灰岩 (灰岩类); II. 准同生白云岩 (泥-微晶白云岩); III. 埋藏白云岩 (粉晶、细晶、中-粗晶白云岩); IV. 晚期充填方解石

Figure 4. Relationship between $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of various carbonate rocks and cements
图 4. 各类碳酸盐岩和胶结物的 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 关系图

主要表现为重结晶和新生变形，此过程会使得白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 在原来基础上向负值偏移，但是这种偏负效应不会“穿越”，即跨过同期海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 到达埋藏白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ [12]，该类白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 皆比海水的 $\delta^{18}\text{O}$ (-5.019‰) 还要偏负，经过分析，可以排除该类白云岩的转化成因。而在埋藏条件下，由于温度升高，相对较轻的同位素氧优先进入了白云石晶格中，在交代流体中相对富集重氧同位素，因此，埋藏条件下形成的该类白云岩自然具有比同期海水还要偏负的 $\delta^{18}\text{O}$ 。

4) 对长兴组各类白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 进行对比分析，并结合岩石学特征，泥-微晶白云岩 → 粉晶白云岩 → 细晶白云岩 → 中-粗晶白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 具有随成岩强度加强而同步负增长的特点，以泥-微晶白云岩 (准同生白云岩) 负偏值最小，晚期方解石负偏值最大，其他类型白云岩介于两者之间。随着成岩作用的加强，相对重同位素氧吸附于先期交代的白云岩而逐渐消耗，因而表现出随成岩作用加强其 $\delta^{18}\text{O}$ 逐渐降低。进一步表明了粉晶白云岩、细晶白云岩、中-粗晶白云岩皆为埋藏条件下交代成因 [13] [14]。

5) 对全球寒武系至白垩系岩石中鞍状白云石，Allen [15] 曾做过统计，统计结果显示氧同位素变化范围为 -18‰~-2.5‰，其中在 -12‰~-5‰ 范围内最为常见，其均一化温度范围大致为 80℃~230℃，这些资料表明鞍状白云石具有热液成因 [16] 性质。Allen 同时对早期低温白云石 $\delta^{18}\text{O}$ 统计显示，其变化范围为 -9.0‰~-6.5‰，叠合在高温 $\delta^{18}\text{O}$ 区间内。长兴组中-粗晶白云岩 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -6.022‰，结合岩石学特征其常见鞍状白云石晶体，反映了该类白云岩形成于相对高温流体中。而粉晶白云岩和细晶白云岩形成于相对低温流体中。

6) 研究区热液白云岩明显受构造控制, 长兴组优质储层围绕广-旺海槽分布, 即在拉张性断层控制下, 盆地深部热液沿断层向上运移并交代碳酸盐岩岩层, 由此形成热液白云岩, 该类白云岩可以作为油气的储集相(HTD) [16]。

5. 结论

1) 根据以上碳、氧稳定同位素分析, 结合岩石学特征, 表明泥-微晶白云岩为蒸发作用下形成的准同生白云岩, 其他各类白云岩为埋藏成因, 又 $\delta^{18}\text{O}$ 逐渐偏负, 成岩作用逐渐加强, 粉晶白云岩为低温流体中早成岩阶段的产物, 细晶白云岩形成于低温流体条件下中成岩阶段, 而中-粗晶白云岩和构造碎裂化白云岩则为晚成岩阶段高温流体交代形成。

2) 结合中-粗晶白云岩岩石学特征和碳、氧同位素分析结果, 反映了该类白云岩成岩温度较高, 在埋藏过程中, 随上覆飞仙关组沉积物不断增多, 长兴组碳酸盐岩埋深不断增加, 温度逐渐升高, 并在上覆沉积物压实作用下, 热液流体沿断层向上运移从而使白云石化继续进行, 有利于形成较好储集层。

3) 不同成岩环境下的白云岩, 有各自的岩石学和碳、氧稳定同位素地球化学特征, 因而对其岩石学和碳、氧同位素做综合研究, 能够更加客观地反映白云岩的成岩环境。

基金项目

国家自然科学基金项目(41402090); 2016年大学生创新创业训练计划项目(2016014)。

参考文献 (References)

- [1] 苏中堂, 陈洪德, 徐粉燕, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩地球化学特征及白云岩化机制分析[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2231-2238.
- [2] 党录瑞, 郑荣才, 郑超, 等. 川东地区长兴组白云岩储层成因与成岩系统[J]. 地质勘探, 2011, 31(11): 47-52.
- [3] 郑荣才, 胡忠贵, 冯清平, 等. 川东北地区长兴组白云岩储层成因研究[J]. 矿物岩石, 2007, 27(4): 78-84.
- [4] 马永生, 牟传龙, 谭钦银, 等. 关于开江-梁平海槽的认识[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 326-331.
- [5] 文华国, 郑荣才, 党录瑞, 等. 四川盆地东部五百梯地区长兴组礁、滩相储层特征[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(2): 24-31.
- [6] 刘永福, 桑洪, 孙雄伟, 等. 塔里木盆地东部震旦-寒武白云岩类型及成因[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, 30(5): 27-31.
- [7] 马锋, 徐怀先, 顾家裕, 等. 塔东寒武系白云岩成因及储集层演化特征[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(2): 144-155.
- [8] 邵龙义, 韩俊, 马锋, 等. 塔里木盆地东部寒武系白云岩储层及相控特征[J]. 沉积学报, 2010, 28(5): 953-961.
- [9] 姚泾利, 王保全, 王一, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶统马家沟组马五段白云岩的地球化学特征[J]. 沉积学报, 2009, 27(3): 381-389.
- [10] 陈代钊, 陈其英, 江茂生. 泥盆系海相碳酸盐岩碳同位素组成及演化[J]. 岩相古地理, 1995, 15(5): 22-28.
- [11] 郑荣才, 胡忠贵, 冯青平, 等. 川东北地区长兴组白云岩储层成因研究[J]. 矿物岩石, 2007, 27(4): 78-84.
- [12] 王保全, 强子同, 张帆, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组马五段白云岩的地球化学特征[J]. 地球化学, 2009, 38(5): 472-479.
- [13] 胡明毅, 胡忠贵, 李思田, 等. 塔中地区奥陶系白云岩岩石地球化学特征及成因机理分析[J]. 地质学报, 2011, 85(12): 2061-2069.
- [14] 黄思静, 佟宏鹏, 刘丽红, 等. 川东北飞仙关组白云岩的主要类型、地球化学特征和白云岩化机制[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2363-2372.
- [15] Allen, J.R. and Wiggins, W.D. (1993) Dolomite Reservoirs: Geochemical Techniques for Evaluating Origin and Distribution (AAPG Continuing Education Course Note Series No. 36). AAPG, Tulsa, 36-129.
- [16] Davies, G.R. and Smith Jr., L.B. (2006) Structurally Controlled Hydrothermal Dolomite Reservoir Facies: An Overview. *AAPG Bulletin*, 90, 1641-1690. <https://doi.org/10.1306/05220605164>

[编辑] 宋换新

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jogt@hanspub.org