

文章编号: 1000-0550(2011)02-0217-09

C、O 同位素在川东北碳酸盐岩储层研究中的应用^①

陈梅¹ 王龙樟^{1,2} 张雄¹ 陈志斌¹

(1. 中国地质大学 武汉 430074; 2. 中国地质大学 构造与油气资源教育部重点实验室 武汉 430074)

摘要 通过对川东北鸡鸣地区碳酸盐岩的 C、O 同位素分析,结合岩石薄片镜下研究和阴极发光分析及前人的研究成果,探讨飞仙关组三级海平面变化趋势和白云岩化作用机理。为了便于分析,将样品分为泥晶灰岩和白云岩两组。泥晶灰岩的 C、O 同位素分析结果表明: $\delta^{13}\text{C}$ 全为正值,明显分为两段,先快速上升,然后低幅振荡下降,指示海平面在飞一段初期快速上升、达到最大海泛面后,呈振荡、缓慢下降的趋势; $\delta^{13}\text{C}$ 演化曲线整体呈上升趋势,与三叠纪全球海平面上升的背景相吻合; $\delta^{18}\text{O}$ 对海平面升降的指示意义不明显,可能是由于后期成岩作用对原始 $\delta^{18}\text{O}$ 的改造所致。白云岩 C、O 同位素分析结果表明: $\delta^{13}\text{C}$ (0.91‰ ~ 2.09‰)、 $\delta^{18}\text{O}$ (-3.45‰ ~ -9.29‰) 的正交投点落在第二象限,结合薄片镜下研究和阴极发光分析,认为研究区白云岩成因为埋藏白云岩化。

关键词 川东北 碳酸盐岩 碳、氧同位素 海平面变化 埋藏白云岩化

第一作者简介 陈梅 女 1985 年出生 硕士研究生 海洋地质学 E-mail: 282682305@163.com

中图分类号 P588.24⁺5 **文献标识码** A

随着国内外大量碳酸盐岩油气田的发现,碳酸盐岩储层研究逐渐成为近 20 年来研究的热点,研究方法和手段也随之多样化、精确化,C、O 同位素分析是碳酸盐岩研究的一个重要的方法,其可行性和可靠性已得到了大量的证实。目前,稳定 C、O 同位素分析已成为指示海平面变化的一个重要指标、反映成岩环境和成岩作用的一个非常有价值的参数^[1~8]。

川东北三叠系飞仙关组已成为我国油气的重点勘探地区之一,普光、罗家寨、铁山坡、渡口河等多个气田的探明储量中,90% 以上都来自三叠系飞仙关组的白云岩地层^[9,10]。从沉积学的角度来说,这些优质储层形成与沉积环境和成岩作用(尤其是白云岩化作用)密切相关^[11,12]。

对于川东北飞仙关组碳酸盐岩沉积环境和沉积相演化、成岩作用、尤其是白云岩化作用和白云岩成因等问题,前人做了大量的工作。一般认为,飞仙关组储层分布与台缘鲕粒滩相的展布密切相关,而鲕粒滩的特征及分布规律又与海平面的升降变化相联系^[12,13]。近年来,国内有许多学者基于岩芯、露头、测井等资料对我国南方(包括四川盆地)晚二叠世—早三叠世沉积特征及相应海平面变化进行了较为深入的研究^[14,15],但很少从 C、O 同位素分析的角度对飞仙关组相对海平面的变化进行研究。已有较多的成果探讨川东北飞仙关组白云岩的成因,但没有统一

认识,目前主要有两种观点:一、早期的蒸发海水白云岩化、混合水白云岩化和渗透回流白云岩化^[16~18];二、封闭条件下埋藏期的热液流体白云岩化和深埋海水/卤水白云岩化^[19,20]。

本文试图通过对川东北宣汉鸡鸣地区飞仙关组(飞一段和飞二段)碳酸盐岩样品进行 C、O 同位素分析,结合岩石薄片镜下研究和阴极发光分析,揭示该区三级海平面的相对变化,探讨白云岩储层的形成机理。

1 地质背景

川东北地区位于四川盆地的东北部,从传统的大地构造观点来看,研究区位于“扬子准地台”的西北缘,与华北板块南缘相邻。四川盆地早二叠世晚期的东吴运动使上扬子地区露出水面,普遍遭受剥蚀,形成西南高、东北低、西陆东海的格局。在此基础上发生的晚二叠世由东向西的海侵沉积过程一直延续到早三叠世飞仙关期。因此在四川盆地东北部地区从晚二叠世到早三叠世沉积的是一套以碳酸盐类为主的地层,是一个连续的海相碳酸盐沉积过程^[21,22]。

宣汉鸡鸣地区飞仙关组总体沉积环境为碳酸盐岩台地,位于城口—鄂西深水陆棚的西侧, $\text{N}31^{\circ}46'.067''$, $\text{E}108^{\circ}28'.683''$ 。鸡鸣剖面是一个峭壁剖面,高约 500 m,宽约 2 000 m,规模宏大。整个飞

^①中国石油化工股份有限公司项目(批准号: P06081)资助。
收稿日期: 2010-01-01; 收修改稿日期: 2010-04-20

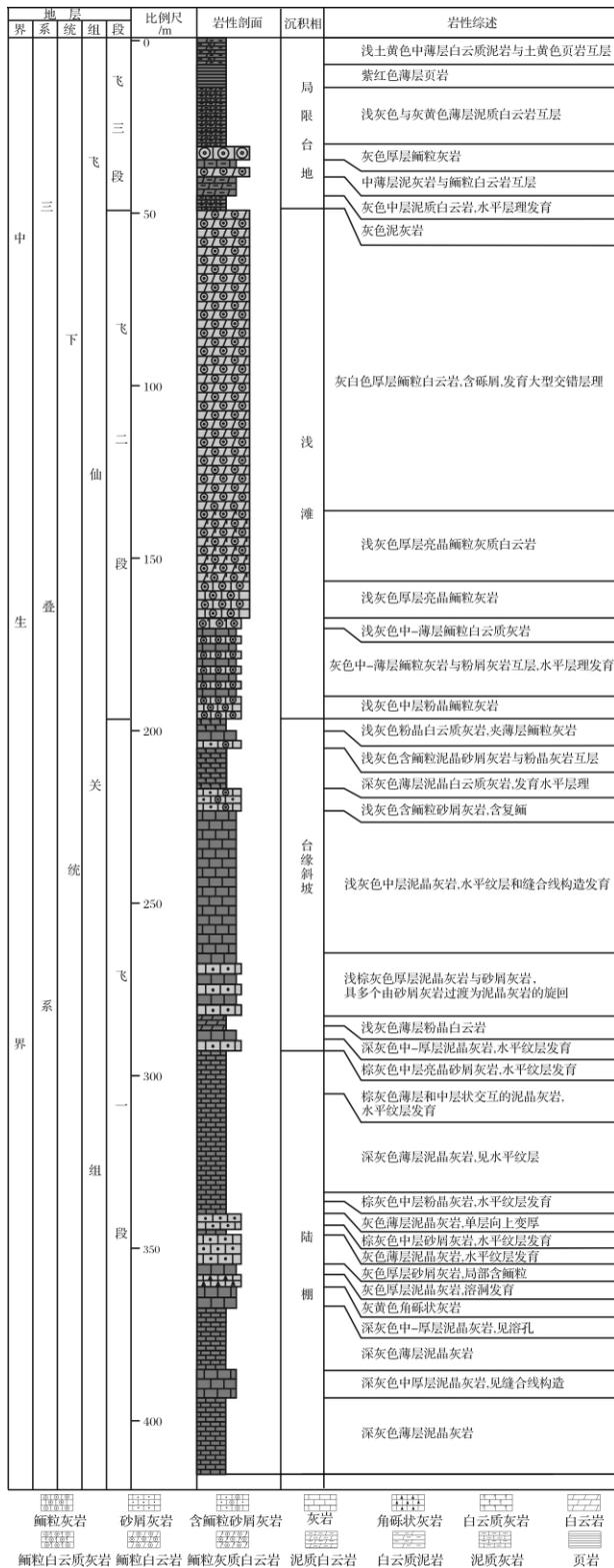


图1 宣汉鸡唱峭壁剖面下三叠统飞仙关组实测剖面图
 Fig.1 The sedimentary section of Low Triassic Feixianguan Formation in Jichang Cliff, Xuanhan

棚相—台缘斜坡相—台缘鲕粒滩相—局限台地相 (图1)。从飞一段到飞四段,岩性由飞一段的泥晶灰岩、含鲕粒泥晶灰岩逐渐过渡到飞二、飞三段的鲕粒灰岩、鲕粒白云岩,再到飞四段的膏云岩。从下往上,鲕粒和白云石含量逐渐增多,反映水体不断变浅、水动力力逐渐增强的过程^①。

2 样品与测试

研究样品采自于川东北宣汉县龙泉乡鸡唱露头剖面,野外采样时尽可能避免裂隙、方解石脉,共采集新鲜碳酸盐岩样品120多个。经显微镜下岩石薄片观察,精心挑选了46个样品用于 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 分析。在这些样品中,有31个样品来自飞一段,另外15个样品来自飞二段。所分析的样品从岩性上看主要是泥晶灰岩、残余鲕粒白云岩、粉—细晶白云岩和鲕粒灰岩(表1)。

C、O同位素测试在中国地质大学(武汉)测试中心完成,用MAT-251质谱仪测定 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$,二者均采用PDB标准,分析误差小于0.1‰。

所有样品的 $\delta^{13}C$ (PDB)均为正值,在0.06‰~2.68‰之间、平均值1.39‰, $\delta^{18}O$ (PDB)值在-9.86‰~-3.45‰之间、平均值-7.37‰。其中泥晶灰岩的 $\delta^{13}C$ 在0.06~2.68‰之间、平均值1.28‰, $\delta^{18}O$ 在-8.87‰~-5.08‰之间、平均值-7.22‰;白云岩的 $\delta^{13}C$ 在0.91‰~2.09‰之间、平均值1.55‰, $\delta^{18}O$ 在-9.29‰~-3.45‰之间、平均值-7.16‰(表1)。

3 碳、氧同位素演化与海平面变化

3.1 样品信息的原始性检验

由于碳酸盐岩对成岩作用的敏感性,在利用碳、氧同位素进行古海洋环境分析时要非常谨慎,因为碳酸盐岩的碳、氧同位素组成并不一定代表沉积期海水的碳、氧同位素组成。本次研究仅选择了方解石含量高于80%的泥晶灰岩的碳、氧同位素分析结果,用来指示海平面的相对变化。

一般认为,泥晶灰岩基本为同生和准同生的^[23]。所选样品的岩石薄片镜下分析表明,成岩组分(胶结物、白云石、重结晶的新生变形体)很少甚至没有,这是因为由泥晶方解石组成的岩石具有很低的原始孔

仙关期 随着海平面的下降,研究区沉积相演化为:陆

① 据中国石油化工股份有限公司项目“川东北碳酸盐岩沉积相及储层精细建模研究”(中国地质大学,2008)修改。

表 1 宣汉鸡唱剖面飞仙关组碳酸盐岩碳、氧同位素分析数据
(* 为本次研究所选用的数据)

Table 1 Analytical data of carbon isotope, oxygen isotope of the Feixianguan carbonate rocks from Jichang section, Xuanhan (the "*" is the date selected for this research)

样品号	地层 年代	累积 厚度/m	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ (PDB)	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ (PDB)	白云石 含量/%	岩性
JC-109	飞 二段	334.63	-8.76	1.66	0	亮晶鲕粒灰岩
JC-106		332.25	-7.14	1.59	6	亮晶鲕粒灰岩
* JC-097		314.66	-9.07	1.64	85	含灰残余颗粒白云岩
* JC-095		306.96	-8.61	1.75	80	含灰残余颗粒白云岩
JC-090		290.58	-7	1.57	30	残余鲕粒云灰岩
* JC-087		277.56	-8.51	2.09	80	含灰残余颗粒白云岩
JC-085		269.27	-7.96	2.02	0	亮晶鲕粒灰岩
JC-082		256.28	-6.22	0.77	10	含云鲕粒灰岩
JC-080		246.06	-9.86	1.31	2	亮晶鲕粒灰岩
JC-079		240.94	-7.29	1.46	0	亮晶残余鲕粒灰岩
JC-078	235.54	-8	1.54	0	亮晶鲕粒灰岩	
* JC-077	230.15	-6.11	1.71	0	泥晶灰岩	
JC-076	227.27	-7.7	1.43	35	云质泥晶灰岩	
* JC-075	207.45	-6.08	1.9	0	泥晶灰岩	
JC-073	203.13	-7.36	0.63	2	鲕粒灰岩	
JC-072	飞 一段	200.96	-7.67	2.06	40	云质泥晶灰岩
JC-071		197.43	-7.54	1.73	0	含鲕粒泥晶灰岩
JC-069		193.89	-8.17	1.57	10	含云鲕粒灰岩
JC-067		185.12	-8.1	1.25	20	含云鲕粒灰岩
* JC-066		184.22	-7.58	1.42	15	含云泥晶灰岩
* JC-064		181.30	-6.43	1.56	0	泥晶灰岩
* JC-050		175.28	-8.35	1.42	1	泥晶灰岩
* JC-049		174.85	-8.78	1.39	20	含云泥晶灰岩
* JC-047		163.91	-8.44	1.18	2	泥晶灰岩
* JC-046		154.52	-7.22	1.17	3	泥晶灰岩
* JC-045		147.13	-7.39	1.26	5	泥晶灰岩
* JC-043		138.34	-6.97	1.43	80	含灰粉晶白云岩
* JC-042		136.93	-8.24	1.42	80	含灰粉晶白云岩
* JC-040		130.57	-7.96	1.36	15	含云泥晶灰岩
* JC-038		126.51	-9.29	1.68	96	细晶一中晶白云岩
* JC-035		122.01	-7.12	0.91	96	细晶一中晶白云岩
* JC-032		116.11	-3.45	1.59	98	粉晶白云岩
* JC-031		114.80	-4.4	1.87	98	粉晶白云岩
* JC-028	107.94	-5.89	1.17	95	粉晶白云岩	
* JC-023	100.56	-7.3	1.65	10	含云泥晶灰岩	
* JC-021	93.85	-6.39	1.17	3	泥晶灰岩	
* JC-020	92.22	-8.87	2.68	3	泥晶灰岩	
* JC-019	77.80	-5.08	2.3	5	泥晶灰岩	
JC-017	50.64	-6.38	1.64	20	含鲕粒含云泥晶灰岩	
* JC-013	41.12	-8.79	1.99	8	泥晶灰岩	
* JC-012	31.62	-5.81	0.67	10	含云粉晶灰岩	
* JC-010	19.36	-7.95	0.06	5	泥晶灰岩	
* JC-009	15.94	-6.09	0.52	15	含云泥晶灰岩	
* JC-007	13.71	-6.13	0.42	10	含云泥晶灰岩	
* JC-003	7.76	-8.06	0.3	10	含云泥晶灰岩	
* JC-001	3.55	-7.56	0.31	5	泥晶灰岩	

隙度,阻止岩石在成岩过程中与流体进行交换造成岩

石具有很低的成岩蚀变性^[24]。因此,可以认为测试样品的碳、氧同位素组分受后期成岩改造的可能性很小,基本能够反映沉积期原始海水的碳、氧同位素信息。

另外,成岩过程是一个丢失 Sr、获取 Mn 的过程, Mn/Sr 比值是判断海相碳酸盐成岩作用和蚀变程度的一个灵敏指标,低 Mn/Sr 比值说明成岩蚀变程度低^[3, 24, 25],黄思静等^[26]认为 Mn/Sr < 2 的碳酸盐岩样品成岩蚀变小,对海水的代表性较好。测试样品的 Mn/Sr 比值很低,最大值不超过 0.2,再次证明了上述结论。

3.2 碳同位素指示海平面变化的基本原理

早在上世纪 80 年代,国外学者就将碳同位素与海平面变化相类比,作为海平面变化判定的参考^[27]。近 20 年来,碳同位素曲线在古海洋环境研究中得到了广泛的应用^[3~6]。

影响海相碳酸盐岩碳同位素变化的因素很多,包括海平面变化、有机质含量、海水温度和盐度变化、大气淡水作用等。然而,在众多影响因素中,自然界有机碳氧化与埋藏相对量是最为重要的。当埋藏量大于氧化量时,更多的¹²C 进入埋藏的有机碳中,将使同期海相碳酸盐岩的¹³C 值向正的方向移动,反之则向负的方向移动^[28]。而在不考虑其他因素的情况下,海平面升降一般与有机质的埋藏量呈正相关,这是因为:一方面,海平面上升,水体循环相对通畅、生物生产力高,藻类等生物通过光合作用消耗大量的¹²C,且高生物生产力意味着有机质产率高,沉降和埋藏速率大,被氧化的机会减小;另一方面,海平面上升,古陆氧化面积减小,因剥蚀而带入海洋的有机碳也随之减少^[3, 4]。因此, $\delta^{13}\text{C}$ 值升高指示海平面的上升,反之指示海平面下降,这是碳同位素指示海平面变化的基本原理。

3.3 碳、氧同位素特征与海平面变化分析

测试样品泥晶灰岩的 $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ (PDB)均为正值,在 0.06‰~2.68‰、平均值 1.28‰。 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显分为 2 段:在飞一段下部快速增加;从飞一段中部到飞二段,呈低幅、震荡缓慢下降趋势(图 2)。由于海相碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值演化与相对海平面变化呈正相关, $\delta^{13}\text{C}$ 值增加指示海平面上升,反之指示海平面下降,因此,可以认为:在飞一段初期,三级海平面变化继承了长时期快速上升的演化趋势,在此时期达到最大海泛面;之后,海平面开始低幅、震荡下降,沉积环境逐渐由深水陆棚环境演化为台地边缘鲕粒滩环境。

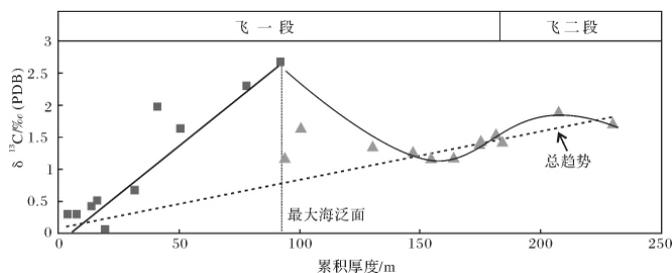


图2 泥晶灰岩的碳同位素特征

Fig. 2 Carbon isotope characteristics of micrite limestones

相对海平面升降控制着沉积环境、沉积相的演化,进而影响横向、纵向沉积物(岩性)分布规律。飞一段初期达到最大海泛,之后随着海平面的不断变浅,在深水陆棚之上逐渐沉积台缘鲕粒滩沉积。

在这里, $\delta^{13}\text{C}$ 最大值所指示的最大海泛面具有双重意义:既是下伏海侵体系域和上覆高位体系域的分界面,又标志着深水陆棚环境向浅水台缘鲕粒滩的演化。

另外,测试样品泥晶灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 1.28‰ 与三叠纪全球海水碳同位素平均值 (1.3‰ 左右) 很相近^[29]。所有泥晶灰岩样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值从飞一段到飞二段整体而言呈缓慢上升趋势(图2),与三叠纪全球海平面上升的背景相吻合。飞一段下部泥晶灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 大多在 0.5‰ 以下,远远低于三叠纪全球海水碳同位素平均值 1.3‰ ,这可能与晚二叠纪末的全球生物大灭绝事件有关。

泥晶灰岩的 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB) 均为负值,在 -8.87‰ ~ -5.08‰ 之间、平均值 -7.22‰ ,呈复杂、无规律的演化趋势(图3)。

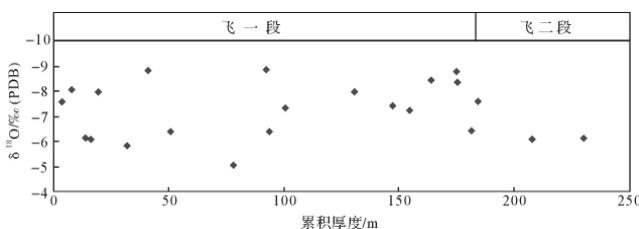


图3 泥晶灰岩氧同位素特征

Fig. 3 Oxygen isotope characteristics of micrite limestones

不同于碳同位素,对于碳酸盐岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值与海平面变化的关系,一般认为,在不考虑其他因素条件下,海平面上升 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低;海平面下降 $\delta^{18}\text{O}$ 值增大^[30]。因此 $\delta^{18}\text{O}$ 的偏移在一定的条件下也可以反映海平面的升降变化。

但是,相对海平面变化而言,碳酸盐岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 受

海水温度、盐度的影响更明显,并且,受后期成岩作用改造强烈。海相碳酸盐岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 随着埋藏深度加大和温度的增高而降低,因此其 $\delta^{18}\text{O}$ 值一般不代表沉积期海水的同位素组成,而是沉积环境和成岩环境的综合, $\delta^{18}\text{O}$ 值的高低反映的是受后期成岩作用改造的相对强弱^[1,5]。

所以,测试样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值对海平面变化的指示意义较差,一般不用 $\delta^{18}\text{O}$ 反映沉积环境。

4 碳、氧同位素特征与白云岩化作用

众多研究表明,由于碳酸盐沉积物对成岩作用的敏感性,沉积时形成的大量原生孔隙绝大多数不能被保存下来,经过漫长的地质历史演化,最终能够成为油气储集空间的是那些在后期成岩过程中形成的各类次生孔隙,因此,成岩环境、成岩作用分析是研究碳酸盐岩储层的关键。判别不同成岩环境、成岩作用采用了多种研究方法,包括稳定碳、氧同位素、微量元素、显微薄片、阴极发光、扫描电镜、流体包裹体、镜质体反射率等,其中稳定碳、氧同位素分析是近年来不断推广的一种有效的方法^[2]。川东北飞仙关组碳酸盐岩储层主要是结晶白云岩和残余鲕粒白云岩储层,基于此,本次研究利用白云岩的碳、氧同位素组成,结合显微薄片观察和阴极发光分析,研究该区白云岩化的成岩环境和机理及白云岩化对储层物性的影响。

前人的研究表明,不同成岩环境的流体具有不同的碳、氧同位素特征(图4):

大气淡水成岩环境的稳定碳、氧同位素组分普遍偏轻,并遵循大气淡水线,即 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围大、从高负值到低正值, $\delta^{18}\text{O}$ 几乎不变、一般为高负值。这是因为大气淡水成岩流体最终的 $\delta^{13}\text{C}$ 组分主要来源为土壤中的 CO_2 (富 ^{12}C) 和早期灰岩溶解产生的 CO_3^{2-} (相对富 ^{13}C),因此从渗流带逐渐往下,成岩流体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值从高负值向低正值逐渐增加,但一般低于正常海水成岩流体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值;氧同位素的蒸发分馏使得大气淡水成岩流体 $\delta^{18}\text{O}$ 向高负值偏移^[31~34]。

正常和蒸发海水成岩环境中的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 均向高正值偏移,现代海水方解石胶结物和白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 正交投点大多位于第一象限^[35~37]。

较深埋藏成岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值向高负值漂移,且与埋深成反比,而 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对较稳定,这是因为 $\delta^{18}\text{O}$ 值受温度的同位素分馏作用所控制,随着地质年代变老(或埋深增加),埋藏温度增加, ^{16}O 优先在矿物中沉

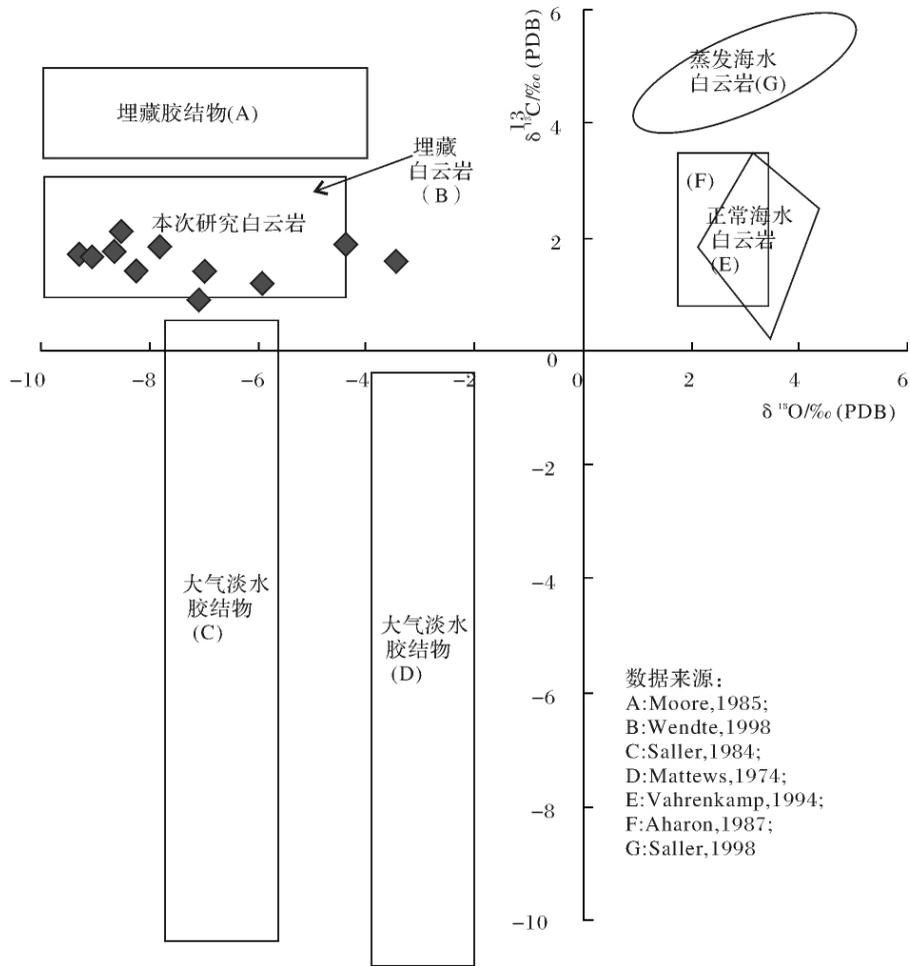


图 4 碳、氧同位素特征与成岩环境

Fig. 4 Carbon and oxygen isotope characteristics and diagenetic environment

淀导致埋藏成岩环境中的 $\delta^{18}\text{O}$ 不断向负值偏移,甚至与大气淡水环境的 $\delta^{18}\text{O}$ 值重叠,而碳同位素不具明显的温度分馏作用,与海水的碳同位素组成相似^[2, 5, 7, 38]。

为了尽量减少其他成岩组分对白云石碳、氧同位素组成的干扰作用,尽可能使全岩的同位素组成代表白云石化流体的同位素特征,本次研究仅选择了白云石含量大于 80% (大多在 90% 以上) 的白云岩样品进行碳氧同位素分析。

所测试的白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 在 0.91‰ ~ 2.09‰、平均值 1.55‰, $\delta^{18}\text{O}$ 在 -9.29‰ ~ -3.45‰、平均值 -7.16‰, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的正交投点均落于第二象限,且不具明显的相关性(图 4),说明研究区的白云岩形成于成岩晚期的埋藏环境,或早期海水成岩环境形成的白云岩经过后期埋藏成岩改造使得白云岩样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值向负值偏移而具有埋藏白云岩的同位素特征。下面将结合岩石薄片的详细观察和阴极发光分

析对此做进一步研究。

如图 5 所示,研究区飞仙关组白云岩主要是粉细晶白云岩和残余鲕粒白云岩。白云石非选择性地交代鲕粒和胶结物,部分白云石经重结晶后呈镶嵌接触,晶体边界模糊,堆积紧密,晶间孔非常有限(图 5A, C)。白云石交代经压实后的鲕粒(图 5B)和埋藏期亮晶胶结物(图 5C),白云石沿缝合线交代且未被缝合线切割(图 5D),说明白云岩化作用发生在压实压溶和埋藏胶结之后。

另外,白云石在阴极发光下具暗红色发光的特征(图 5F),这就意味着白云岩化是在埋藏条件下发生的。因为在近地表的氧化环境下,Fe 和 Mn 会以高价态出现,高价的 Fe、Mn 离子无法进入白云石晶格中^[40],因此近地表大气淡水、海水和混合水环境形成的同生和准同生白云岩在阴极射线下不发光。只有在还原状态下, Fe^{2+} (阴极发光的猝灭剂) 和 Mn^{2+} (阴极发光的激发剂) 才有可能取代白云石晶格中的

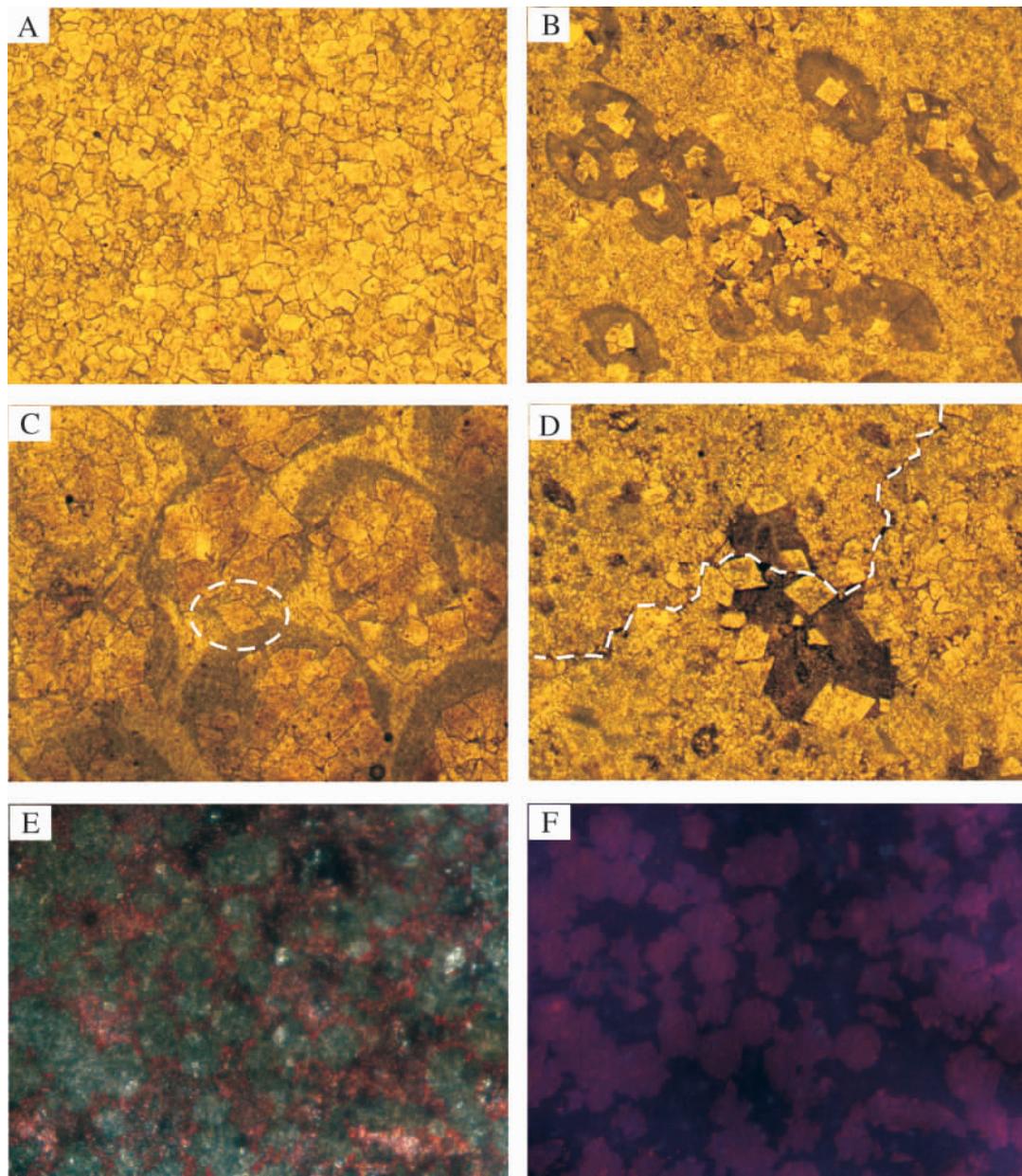


图5 宣汉鸡唱剖面飞仙关组碳酸盐岩的显微照片和阴极发光照片(单偏光,视域高2.2 mm)

- A. 细晶白云岩,白云石晶体呈它形、半自形,晶体边界平直或舌状,紧密堆积,部分重结晶化,产生的晶间孔非常有限; B. 含鲕粒云质灰岩,鲕粒经压实后变形、破碎、且定向排列,交代鲕粒的白云石呈近自形、未经压实作用的改造; C. 亮晶残余鲕粒白云岩,鲕粒和胶结物普遍白云岩化,白云石晶体近自形、细晶—中晶结构,白云石交代埋藏期的亮晶胶结物; D. 含鲕粒云质灰岩,白云石沿缝合线分布,缝合线未切割白云石晶体; E. 残余灰质白云岩,茜素红染色; F. E的阴极发光照片,白云石具暗红色发光

Fig. 5 Photomicrographs and CL photos from thin sections of the Feixianguan carbonate rocks in Jichang section, Xuanhan (Plane-polarized light, vertical axis = 2.2 mm)

Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 埋藏环境才具备这种条件。

综合碳、氧同位素分析结果和岩石薄片的详细观察以及阴极发光分析,推断研究区飞仙关组的白云岩形成机理可能为封闭条件下深埋藏白云岩化。

5 成岩作用对储层物性的影响

研究区发育大规模台缘鲕粒滩,为优质储层的发育创造了沉积条件,但是样品的孔隙度却很低,最大

孔隙度不超过 2% 这是因为成岩作用破坏了大量的原生孔隙,而产生的次生孔隙却非常有限,主要有以下三个方面的原因:

(1) 未经过大气淡水成岩作用的改造。有三个方面的证据:首先,所测试样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 均为正值,而经大气淡水改造过的碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 一般为低负值到高负值;其次,经公式 $Z = 2.048 \times (\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498 \times (\delta^{18}\text{O} + 50)$ (δ 标准为 PDB) [39] 计算得到的所有碳酸盐岩样品(除泥晶灰岩、白云岩外还包括鲕粒灰岩和残余鲕粒云质灰岩) Z 值全大于 120, $Z > 120$ 时为海相碳酸盐岩;另外,岩石显微薄片中也并没有发现新月形、重力胶结等判别大气淡水成岩作用的成岩组构。

(2) 压实作用、胶结作用、重结晶作用破坏了绝大多数的原生孔隙和有限的次生孔隙。

(3) 埋藏白云岩化作用和溶蚀作用产生的次生孔隙非常有限。白云石晶体紧密堆积,经重结晶改造后大多呈镶嵌接触,晶间孔非常有限。研究区飞仙关组碳酸盐岩未经大气淡水淋滤作用的改造,经强烈的压实和胶结作用后,岩石的孔渗性很差,不利于埋藏期溶蚀流体的流动,溶蚀作用微弱。

6 结论

(1) 所选 46 个碳酸盐岩样品的 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 值均为正值,在 0.06 ~ 2.68‰ 之间、平均值 1.39‰,与早三叠纪全球海水的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (1.3‰ 左右) 相近, $\delta^{18}\text{O}$ (PDB) 值均为负,在 -9.86 ~ -3.45‰ 之间、平均值 -7.37‰。

(2) 泥晶灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显分为两段,先快速上升、然后低幅振荡下降,指示海平面在飞一段初期快速上升、达到最大海泛面,之后,呈震荡、缓慢下降的趋势,沉积环境由深水陆棚环境逐渐向浅水台缘鲕粒滩环境演化;所有泥晶灰岩样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值从飞一段到飞二段整体而言呈缓慢上升趋势,与三叠系全球海平面上升的背景相吻合; $\delta^{18}\text{O}$ 对海平面升降的指示意义不明显,可能是由于后期成岩作用对原始 $\delta^{18}\text{O}$ 的改造所致。

(3) 白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (0.91 ~ 2.09‰)、 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (-3.45 ~ -9.29‰) 的正交投点落在第二象限,结合薄片镜下研究和阴极发光分析,认为研究区白云岩成因可能为埋藏白云石化。

(4) 研究区飞仙关组碳酸盐岩未经大气淡水成岩作用的改造,压实作用、胶结作用破坏了大量的原

生孔隙,溶蚀作用和埋藏期的白云岩化作用产生的次生孔隙非常有限,导致研究区白云岩的储层物性差,最大孔隙度不超过 2%。

致谢 评审专家为本文提供了宝贵的意见,特此致谢。

参考文献 (References)

- 1 张秀莲. 碳酸盐岩中碳、氧同位素与古盐度、古水温的关系[J]. 沉积学报, 1985, 3(4): 17-28 [Zhang Xiulian. Relationship between carbon and oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1985, 3(4): 17-28]
- 2 陈荣坤. 稳定氧碳同位素在碳酸盐岩成岩环境研究中的应用[J]. 沉积学报, 1994, 12(4): 11-20 [Chen Rongkun. Application of stable oxygen and carbon isotope in the research of carbonate diagenetic environment[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(4): 11-20]
- 3 严兆彬, 郭福生, 潘家永, 等. 碳酸盐岩 C、O、Sr 同位素组成在古气候、古海洋环境研究中的应用[J]. 地质找矿论丛, 2005, 20(1): 53-56 [Yan Zhaobin, Guo Fusheng, Pan Jiayong, et al. Application of C, O and Sr isotope composition of carbonates in the research of paleoclimate and paleoceanic environment[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2005, 20(1): 53-56]
- 4 李荣西, 魏家庸, 肖家飞, 等. 海进体系域碳氧同位素地球化学响应——以黔西南地区三叠系为例[J]. 地球科学与环境学报, 2007, 29(1): 1-5 [Li Rongxi, Wei Jiayong, Xiao Jiafei, et al. Response of carbon and oxygen isotopic geochemistry to transgressive systems tract: an example from Triassic stratigraphy in southwestern Guizhou Province [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, 29(1): 1-5]
- 5 Anderson T F, Arthur M A. Stable isotopes of oxygen and carbon and their application to sedimentologic and paleoenvironmental problems [C]// Arthur M A. Stable Isotopes in Sedimentary Geology, Tulsa: SEPM Short Course, 1983, 10: 1-51
- 6 Jenkyns H C, Gale A S, Corfield R M. Carbon and oxygen isotope stratigraphy of the English Chalk and Italian Scaglia and its paleoclimatic significance[J]. Geological Magazine, 1994, 131: 1-34
- 7 Wendte J, Dravis J, Stasiuk L, et al. High-temperature saline dolomitization of Devonian Swan Hills platform and bank carbonate, Wild River area[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1998, 46: 210-265
- 8 Rasser M, Fenninger A. Paleoenvironmental and diagenetic implications of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ isotope ratios from the Upper Jurassic Plassen limestone[J]. Geobios, 2002, 35: 41-49
- 9 王一刚, 文应初, 洪海涛, 等. 川东北三叠系飞仙关组深层鲕滩气藏勘探目标[J]. 天然气工业, 2004, 24(12): 5-9 [Wang Yigang, Wen Yingchu, Hong Haitao, et al. Exploration target of the deep oolitic beach gas reservoir of the Triassic system Feixianguan Formation in northeast part of Sichuan basin [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(12): 5-9]
- 10 冉隆辉, 陈更生, 张健, 等. 四川盆地东北部飞仙关组滩层分布研究与勘探潜力分析[J]. 中国石油勘探, 2002, 7(1): 46-55 [Ran

- Longhui, Chen Gengsheng, Zhang Jian, *et al.* The study of Feixianguan oolitic beach reservoir distribution and analysis of exploration potential in the northeast of Sichuan basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2002, 7(1): 46-55
- 11 王一刚, 文应初, 洪海涛, 等. 四川盆地三叠系飞仙关组气藏储层成岩作用研究 [J]. *沉积学报*, 2007, 25(6): 831-839 [Wang Yigang, Wen Yingchu, Hong Haitao, *et al.* Diagenesis of Triassic Feixianguan Formation in Sichuan basin, southern China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(6): 831-839]
 - 12 马永生. 四川盆地普光超大型气田的形成机制 [J]. *石油学报*, 2007, 28(2): 9-16 [Ma Yongsheng. Generation mechanism of Pu-guang Gas Field in Sichuan basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(2): 9-16]
 - 13 刘划一, 张静, 洪海涛. 四川盆地东北部长兴组飞仙关组气藏形成条件研究 [J]. *天然气勘探与开发*, 2001: 30-38 [Liu Huayi, Zhang Jing, Hong Haitao. The formation conditions of gas reservoir of Changxing Formation and Feixianguan Formation in northeastern Sichuan basin [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2001: 30-38]
 - 14 魏魁生, 徐怀大, 叶淑芬. 四川盆地层序地层特征 [J]. *石油与天然气地质*, 1997, 18(2): 151-157 [Wei Kuisheng, Xu Huaida, Ye Shufen. Sequence stratigraphic characteristics of Sichuan basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 1997, 18(2): 151-157]
 - 15 王兴志, 张帆, 马青, 等. 四川盆地东部晚二叠世—早三叠世飞仙关期礁、滩特征与海平面变化 [J]. *沉积学报*, 2002, 20(2): 249-254 [Wang Xingzhi, Zhang Fan, Ma Qing, *et al.* The characteristics of reef and bank and the fluctuation of sea-level in Feixianguan Period of Late Permian-Early Triassic, east Sichuan basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(2): 249-254]
 - 16 苏立萍, 罗平, 胡社荣, 等. 川东北罗家寨气田下三叠统飞仙关组鲕粒滩成岩作用 [J]. *古地理论*, 2004, 6(2): 182-190 [Su Liping, Luo Ping, Hu Shorong, *et al.* Diagenesis of oolitic bank of the Feixianguan Formation of Lower Triassic in Luoiazhai gas field, northeastern Sichuan Province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(2): 182-190]
 - 17 魏国齐, 杨威, 张林, 等. 川东北飞仙关组鲕粒滩储层白云石化成因模式 [J]. *天然气地球科学*, 2005, 16(2): 162-166 [Wei Guoqi, Yang Wei, Zhang Lin, *et al.* Dolomitization genetic model of Feixianguan Formation reservoir in the northeast Sichuan basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16(2): 162-166]
 - 18 陈更生, 曾伟, 杨雨, 等. 川东北部飞仙关组白云石化成因探讨 [J]. *天然气工业*, 2005, 25(4): 40-41 [Chen Gengsheng, Zeng Wei, Yang Yu, *et al.* Discussion on dolomitization genesis of Feixianguan Formation in northeast Sichuan [J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(4): 40-41]
 - 19 郑荣才, 耿威, 郑超, 等. 川东北地区飞仙关组优质白云岩储层的成因 [J]. *石油学报*, 2008, 29(6): 15-21 [Zheng Rongcai, Geng Wei, Zheng Chao, *et al.* Genesis of dolostone reservoir of Feixianguan Formation in Lower Triassic of northeast Sichuan basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(6): 15-21]
 - 20 黄思静, Hairuo Qing, 裴昌蓉, 等. 川东三叠系飞仙关组白云岩锶含量、锶同位素组成与白云岩化流体 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(8): 2123-2132 [Huang Sijing, Hairuo Qing, Pei Changrong, *et al.* Strontium concentration, isotope composition and dolomitization fluids, in the Feixianguan Formation of Triassic, eastern Sichuan of China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(8): 2123-2132]
 - 21 李国军, 郑荣才, 唐玉林, 等. 川东北地区飞仙关组层序—岩相古地理特征 [J]. *岩性油气藏*, 2007, 19(4): 64-70 [Li Guojun, Zheng Rongcai, Tang Yulin, *et al.* Sequence-based lithofacies and palaeogeography of Lower Triassic Feixianguan Formation in northeastern Sichuan basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2007, 19(4): 64-70]
 - 22 冯仁蔚, 王兴志, 张帆, 等. 四川盆地东北部下三叠统飞一~飞三段孤立碳酸盐岩台地沉积相及相关研究 [J]. *中国地质*, 2008, 35(1): 54-66 [Feng renwei, Wang Xingzhi, Zhang Fan, *et al.* Sedimentary facies of isolated carbonate platform of the first to third members of the Lower Triassic Feixianguan Formation in the northeastern part of the Sichuan basin and other related aspects [J]. *Geology in China*, 2008, 35(1): 54-66]
 - 23 姜在兴. *沉积学* [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 195 [Jiang Zaixing. *Sedimentology* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 195]
 - 24 黄思静, 石和, 毛晓冬, 等. 早古生代海相碳酸盐的成岩蚀变性及其对海水信息的保存性 [J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2003, 30(1): 9-18 [Huang Sijing, Shi He, Mao Xiaodong, *et al.* Diagenetic alteration of Earlier Palaeozoic marine carbonate and preservation for the information of sea water [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2003, 30(1): 9-18]
 - 25 李心清, 万国江. 碳酸盐岩氧、碳稳定同位素地球化学研究目前面临的几个问题 [J]. *地球科学进展*, 1999, 14(3): 262-268 [Li Xinqing, Wan Guojiang. Problems in studies on carbon and oxygen stable isotopes in carbonates [J]. *Advances in Earth Science*, 1999, 14(3): 262-268]
 - 26 黄思静, Qing Hairuo, 黄培培, 等. 晚二叠世—早三叠世海水的锶同位素组成与演化—基于重庆中梁山海相碳酸盐的研究结果 [J]. *中国科学: D 辑*, 2008, 37(3): 273-383 [Huang Sijing, Qing Hairuo, Huang Peipei, *et al.* The strontium isotope composition and evolution of sea water in Late Permian-Early Triassic-basin on the research of marine carbonate in Chongqing [J]. *Science in China: Series D*, 2008, 37(3): 273-383]
 - 27 Jenkyns H C. Cretaceous anoxic events: From continents to oceans [J]. *Journal of the Geological Society*, 1980, 137: 171-188
 - 28 黄思静. 上扬子地台区晚古生代海相碳酸盐岩的碳、锶同位素研究 [J]. *地质学报*, 1997, 71(1): 45-53 [Huang Sijing. A study on carbon and strontium isotope of late Paleozoic carbonate rocks in the Upper Yangtze Platform [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1997, 71(1): 45-53]
 - 29 Veizer J, Fritz P, Jones B. Geochemistry of brachiopods: oxygen and carbon isotopic records of Paleozoic oceans [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50: 1679-1691
 - 30 刘建清, 贾保江, 杨平, 等. 碳、氧、锶同位素在羌塘盆地龙尾地区层序地层研究中的应用 [J]. *地球学报*, 2007, 28(3): 253-260 [Liu

- Jianqing, Jia Baojiang, Yang Ping, *et al.* The application of carbon, oxygen and strontium isotopes to the study of Middle-Upper Jurassic sequence stratigraphy in Longwei Area, Qiangtang basin [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 28(3): 253-260
- 31 Mattews R K. A process approach to diagenesis of reef-associated limestones [C] // Lapovte L F. *Reefs in Time and Space*. Tulsa: SEPM Special Publication, 1974, 18: 234-256
- 32 Saller A H. Petrologic and geochemical constraints on the origin of subsurface dolomite, Enewetak Atoll: an example of dolomitization by normal sea water [J]. *Geology*, 1984, 12: 217-220
- 33 Lohmann K C. Geochemical patterns of meteoric diagenetic systems and their application to studies of paleokarst [C] // James N P, Choquette P W. *Paleokarst*. New York: Springer-Verlag, 1988: 58-80
- 34 Melim L A, Westphal H, Swart P K, *et al.* Questioning carbonate diagenetic paradigms: evidence from the Neogene of the Bahamas [J]. *Marine Geology*, 2002, 185: 27-53
- 35 Aharon P, Socki R A, Chan L. Dolomitization of atolls by sea water convective flow: test of a hypothesis at Niue [J]. *South Pacific Journal of Geology*, 1987, 95: 187-203
- 36 Vahrenkamp V C, Swart P K. Late Cenozoic dolomites of the Bahamas: metastable analogues for the genesis of ancient platform dolomites [C] // Purser B, Tucker M, Zenger D. *Dolomites*. International Association of Sedimentologists Special Publication, 1994, 21: 133-153
- 37 Saller A H, Henderson N. Distribution of porosity and permeability in platform dolomites: insight from the Permian of west Texas [J]. *AAPG Bulletin*, 1998, 82: 1528-1550
- 38 Moore C H. Upper Jurassic subsurface cements: a case history [C] // Schneidermann N, Harris P M. *Carbonate Cements*, Tulsa: SEPM Special Publication, 1985, 36: 291-308
- 39 Keith M L, Weber J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, 28: 1786-1816
- 40 王一, 王兴志, 王一刚, 等. 川东北下三叠统飞仙关组白云岩的地球化学特征 [J]. *沉积学报*, 2009, 27(6): 1043-1049 [Wang Yi, Wang Xingzhi, Wang Yigang, *et al.* Geochemical characteristics of dolomites in Lower Triassic Feixianguan Formation, Northeast Sichuan, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(6): 1043-1049]

Application of Carbon and Oxygen Isotope to Carbonate Reservoirs in Northeast Sichuan Basin

CHEN Mei¹ WANG Long-zhang^{1,2} ZHANG Xiong¹ CHEN Zhi-bin¹

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074;

2. Key Laboratory of Techniques and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Abstract The trend of third-order sea-level changes and mechanism of dolomitization are studied, based on C, O isotope analysis of carbonate rocks, as well as microscopic research, CL analysis, and previous studies of Feixianguan Formation in Jichang of northeast Sichuan Basin. In convenience to analysis, the samples were grouped into two sets of micrite limestone and dolomite. The C, O isotope analysis of micrite limestone shows that the value of $\delta^{13}\text{C}$ are all positive, and two stages are clear, that is, the first stage is a fast rising stage and followed a falling-stage with a wave shape. The result suggests that the sea level increases quickly in the early First Section of Feixianguan Formation, then, shows a slowly falling trend with sublevel fluctuation after maximum flooding surface. The $\delta^{13}\text{C}$ evolution curve is rising totally, which is in accord with the rising trend of the Triassic global sea level. The implications of $\delta^{18}\text{O}$ on the sea-level changes is obscure, due to the processes of late diagenesis. The C, O isotope analysis of dolomite shows that the orthogonal points of $\delta^{13}\text{C}$ (0.91‰ ~ 2.09‰) and $\delta^{18}\text{O}$ (-3.45‰ ~ -9.29‰) fall in the second quadrant. The result, combining with microscope studies and cathodeluminescent analysis, suggests that dolomitization was formed in the buried condition.

Key words Northeast Sichuan Basin; carbonate rocks; carbon and oxygen isotope; sea-level changes; burial dolomitization