

## 四川盆地早三叠世

# 多尺度海平面变化旋回及对储层发育的影响

肖娇静, 王龙樟, 陈梅, 陈志斌, 周杰, 陈鹏

(中国地质大学 海洋学院, 武汉 430074)

**摘要:**四川盆地东北部鸡唱峭壁剖面发育了下三叠统碳酸盐鲕粒浅滩层序。为揭示该层序形成过程中的海平面变化, 进行了一系列同位素和元素地球化学分析。C 和 O 同位素变化反映了高频的海平面变化, 可用于地层层序的划分。 $\delta^{13}\text{C}$  增加和  $\delta^{18}\text{O}$  的减少, 表明海平面的上升, 发育退积准层序组;  $\delta^{13}\text{C}$  的减少和  $\delta^{18}\text{O}$  的增多表明海平面下降, 发育进积准层序组。样品采自飞一段至飞二段, 这两段共识别了 5 个准层序组, 即 pss1-pss5。整个研究层段共划分了 5 个五级海平面变化旋回及 2 个四级海平面变化旋回。Sr 和 Mn 含量变化反映了低频的海平面变化, 也可用于背景分析以及验证样品是否保持原始沉积成岩环境。Sr 同位素的上升趋势, 与全球海平面的上升同步; Mn 的含量与古水深有关, 常富集于深水区, 表现为 Mn 的含量在离岸深水区较岸边浅水区高。Sr、Mn 含量的变化揭示了长期的海平面变化趋势。

**关键词:** 碳氧同位素; 海平面变化; 层序; 早三叠世; 四川盆地

**中图分类号:** TE122.2

**文献标识码:** A

## Multiple scale fluctuations of the Early Triassic sea level and its influence on reservoirs in the Sichuan Basin

Xiao Jiaojing, Wang Longzhang, Chen Mei, Chen Zhibin, Zhou Jie, Chen Peng

(College of Marine Science and Technology, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** Multiple scale sequences of carbonate oolitic bank developed in Jichang profile of the northeastern Sichuan Basin in the Early Triassic. Several isotopic and elemental proxies were used to reveal the sea-level fluctuation when those sequences formed. The changes of carbon and oxygen isotopes, which are coincident with the high frequency sea level fluctuation, could be used for stratigraphic sequence division.  $\delta^{13}\text{C}$  increasing and  $\delta^{18}\text{O}$  decreasing are used as the proxies of sea level rising, showed in regressive parasequence sets.  $\delta^{13}\text{C}$  decreasing and  $\delta^{18}\text{O}$  increasing are used as the proxies of sea level falling, detected from transgressive parasequence sets. Five parasequence sets, named as pss1-pss5, were distinguished from the first and second members of the Feixianguan Formation from where we sampled. 5 fifth order cycles of sea level fluctuation were recognized and grouped into 2 fourth order cycles of sea level fluctuation. The Sr and Mn contents indicate the low frequency fluctuation of sea level, indicating the background of sedimentary and diagenetic environment. The increasing contents of Sr isotope are coincide with the long-term fluctuation of global sea level. Mn contents are related to water depth, enriching in deep water and poor in shallow littoral water. The Sr, Mn content changes indicate the long-term trend of the sea level fluctuation.

**Key words:** carbon and oxygen isotopes; sea level fluctuation; sequence stratigraphy; Early Triassic; Sichuan Basin

海平面变化对地质时期地层研究有较大意义, 但是由于沉积物在形成过程中难免受到地壳运动的影响, 从而使得海平面变化无法直接测量<sup>[1-3]</sup>, 然而通过海平面变化留下的沉积记录和同位素记录, 可以间接研究海平面变化。近年来, 碳氧同位素记录常被用于重塑一个地区的海平面变化过程。

李荣西等<sup>[4]</sup>认为造成氧同位素在海水中分馏的原因是海水蒸发和淡水注入, 蒸发会使海平面下降, 且优先蒸发轻的同位素<sup>16</sup>O, 因而海水中富含<sup>18</sup>O; 淡水注入, 会使海平面上升, 带来更多的<sup>16</sup>O, 所以海水中<sup>18</sup>O 相对减少。而碳同位素的相对变化主要受控于生物作用: 海平面上升, 生物繁盛, 有

收稿日期: 2017-03-14; 修订日期: 2017-07-18。

作者简介: 肖娇静 (1993—), 女, 硕士研究生, 从事海洋地质与资源研究。E-mail: 13098805730@163.com。

通信作者: 王龙樟 (1965—), 男, 博士, 教授, 从事石油地质与海洋地质研究。E-mail: longz\_wang@cug.edu.cn。

基金项目: 中国石油化工股份有限公司基础攻关项目“川东北碳酸盐岩沉积相及储层建模研究”及“川东北台缘沉积建模及地震沉积学研究”。

机质的产率和埋藏速率均增高,被氧化机会减少,因此 $\delta^{13}\text{C}$ 值增高。Stemmerik等<sup>[5]</sup>指出在平衡的成岩体系中, $^{13}\text{C}$ 较 $^{18}\text{O}$ 要相对稳定,这是因为 $^{13}\text{C}$ 在固相中迁移所需要的孔隙溶液远远比 $^{18}\text{O}$ 要多得多,因此 $^{18}\text{O}$ 值非常容易受成岩作用的影响。

除了碳氧同位素外,Sr同位素以及Mn的含量也能佐证海平面的变化。当海平面下降时,陆壳受到更强的风化作用,导致进入海洋的壳源铈增多,海水中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值相对增高;而当海平面上升时,铈主要来源于地幔,壳源铈减少,从而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 减小。因此,整体上 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的变化与海平面变化成负相关关系。在地质历史中,通常认为古陆的扩大以及海平面的下降,会导致 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值在海相碳酸盐中发生正偏移,反之,发生负偏移<sup>[6-7]</sup>。

Mn的含量反映古水深的变化,Mn常富集于深水海底,深水海相泥(页)岩及泥晶石灰岩中的Mn含量常比陆相同类岩石中要高,海盆中心也较岸边高。因此,泥(页)岩及泥晶石灰岩中的Mn或MnO含量既常用作离岸远近的指标,也常用来推测相对古水深<sup>[8]</sup>,高志前等<sup>[9]</sup>认为较低的Mn含量对应着较小的相对海平面变化或古水深,且Mn含量与古水深的变化表现为正相关关系。

本文旨在研究早三叠世碳氧同位素以及Sr同位素和Mn含量的变化与海平面变化的耦合关系,从高频和低频2种尺度探讨海平面的升降变化及其对储层物性的影响。海平面的多尺度变化主要表现在四级和五级海平面的划分和对比上。而沉积层序的旋回性在某种程度上是海平面变化作用的结果,因此将碳氧同位素变化与野外观察到的旋回变化和层序划分相比较,提出同位素变化与沉积旋回和海平面变化存在耦合关系。

## 1 地质背景

四川盆地是被褶皱和断裂所围限的巨大构造盆地,盆地东北一侧属于大巴山造山带,西北部是龙门山造山带,北部为米仓山隆起,东南和西南一侧是滇黔川鄂台裙带。震旦纪以来经历了加里东—印支期多次的构造运动,从震旦纪到中三叠世发育了多个海相碳酸盐岩沉积旋回。

川东北地区位于大巴山前缘,受其造山带作用影响,导致了下二叠统部分地层普遍缺失,并形成一个区域性不整合面。东吴运动致使川东北地区形成了开江—梁平海槽,该海槽及两翼的断裂构造控制了飞仙关组沉积期的沉积相展布和优质鲕粒滩相储层分布,也为形成下三叠统飞仙关组鲕粒滩

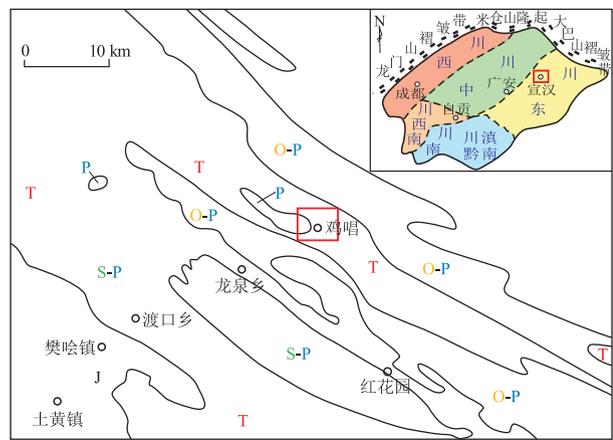


图1 四川盆地东北部地质略图<sup>[11]</sup>及采样位置

Fig.1 Sketch geological map of the northeastern Sichuan Basin, showing sampling locations

气藏奠定了基础。中三叠世末期,受早印支运动影响,构造抬升,海水退出上扬子准地台,南方的海相沉积历史基本结束<sup>[10]</sup>。

鸡唱剖面地处四川盆地东北部宣汉县龙泉乡鸡唱村(图1),是一个峭壁剖面,高约500 m,宽约2 000 m,剖面完整出露下三叠统飞仙关组。通过峭壁露头刻画,勾绘出台地及台地边缘鲕粒浅滩的发育状态,重现海平面的相对变化过程。飞仙关组自下而上沉积了陆棚相—台缘斜坡相—浅滩相—局限台地相,反映水体逐渐变浅的海退过程。

## 2 采样与分析

本次样品采自于川东北宣汉县龙泉乡鸡唱露头剖面,共采集了120多个新鲜的碳酸盐岩样品,采样过程中尽可能避免后期构造形成的裂隙、方解石脉。通过显微镜下岩石薄片的观察,挑选了50个样品用于C和O同位素分析,其中35个样品来自飞一段,15个样品来自飞二段。飞一段以泥晶灰岩、中—薄层粉晶灰岩为主,间夹基质支撑含鲕粒云灰岩和颗粒支撑砂屑白云岩;飞二段岩性组合包括中—厚层、块状鲕粒灰岩、残余鲕粒云质灰岩、以及残余鲕粒白云岩。在这挑选的50个样品中有8个样品进行了铈同位素以及锰含量的测试。

C、O同位素以及Mn、Sr的测试都是在中国地质大学(武汉)测试中心完成。C、O同位素用MAT-251质谱仪测定,采用PDB标准,分析误差小于0.1‰;锰、铈含量分析采用原子吸收光度法测试。

## 3 结果讨论

### 3.1 C、O同位素交会

将C、O同位素进行交会,不同条件下C、O同

位素的数值范围有一定的规律。海相碳酸盐沉积物在成岩作用过程中,如果没有发生变质作用,受埋藏成岩作用影响较小,且后期不经受明显的大气淡水成岩作用,那么其 C、O 同位素数值一般落在海水成岩区;而如果沉积物经历了明显大气淡水成岩作用,其 C、O 同位素数值一般落在淡水成岩区。因此 C、O 同位素有以下特征:大气淡水环境中表现为  $\delta^{13}\text{C}$  为低—中负值,  $\delta^{18}\text{O}$  为高负值;海水成岩环境中则表现为  $\delta^{13}\text{C}$  值大于零,  $\delta^{18}\text{O}$  值小于零<sup>[12]</sup>。

现把 50 个样品的 C、O 同位素进行交会(图 2),有 47 个样品落在海水成岩的区域,大致与 Wendte 等<sup>[13]</sup>划分的埋藏白云区相当,仅 3 个样品落在淡水成岩区域,大致与 Saller 等<sup>[14]</sup>划分的大气淡水胶结物区相当,后 3 个样品可能受到淡水置换的影响,表明这些样品经历了后期的改造,在分析中予以剔除。

通过对样品分析,样品中的  $\delta^{13}\text{C}$  范围在  $-1\text{‰}$ ~ $2.68\text{‰}$ 之间,平均值为  $1.32\text{‰}$ ;  $\delta^{18}\text{O}$  值在  $-9.86\text{‰}$ ~ $-3.45\text{‰}$ 之间,平均值为  $-7.32\text{‰}$ 。碳酸盐岩的 O 同位素易受成岩作用影响,且其结果是会使原岩中  $\delta^{18}\text{O}$  值降低, Kaufman 等<sup>[15]</sup>进一步明确指出,  $\delta^{18}\text{O}$  值只有大于  $-10\text{‰}$ (或  $-11\text{‰}$ )的数据才能使用。而测试结果显示  $\delta^{13}\text{C}$  值都在  $\pm 5\text{‰}$ 之间,  $\delta^{18}\text{O}$  值都远大于  $-10\text{‰}$ ,也证明了剔除后的样品能够指示原始沉积及成岩环境, C、O 同位素可以用于指示古沉积环境或准沉积的成岩环境。

### 3.2 Sr 同位素值和 Mn 含量

黄思静<sup>[16]</sup>等认为样品的 Mn 和 Sr 含量(包括 Mn/Sr 比值)能较好地判断其对海水的代表性,当样品的 Mn/Sr 比值小于 2 时,说明成岩蚀变小,能代表当时的海水环境。测试结果表明,锶锰比值普遍偏低,都小于 0.2,而且 Sr 含量都比较高,而锰的含量比较低,说明这些样品没有受到后期的改造。

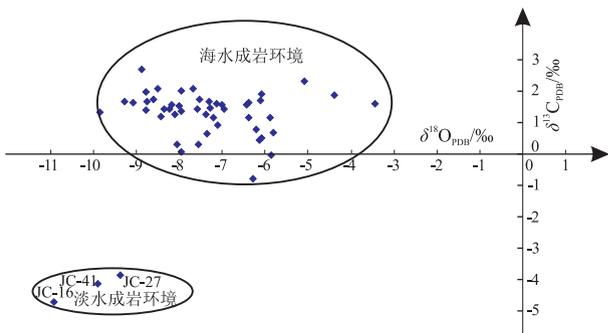


图 2 四川盆地飞仙关组 C、O 同位素交会图

Fig.2 Cross-plots of carbon and oxygen isotopes sampled from the Feixianguan Formation, Sichuan Basin

锶同位素经常被用于地层年代学研究。Wickman<sup>[17]</sup>等提出,就全球范围内,不管哪一个时期,锶同位素组成在海水中都是均一的,海水的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  的值是时间的函数。本文中样品  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  总体趋势是随着时间的推移逐渐增大(图 3)。将飞仙关组样品  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  的值投点到 Veizer<sup>[18]</sup>等制作的全球锶同位素变化曲线图中(图 4),发现飞仙关组样品  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值变化趋势与全球 Sr 同位素变化趋势是一致的,都呈现上升趋势。这些样品都落在早三叠世早期的区间范围。

从 Haq 图解上<sup>[19]</sup>可以看出,早三叠世全球海平面呈上升趋势,因此古陆面积减少。从理论上,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值应该呈下降的趋势。但实际上,无论是全球的统计结果,还是本区的测试结果,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值不但没有下降,反而呈现快速上升的趋势。Korte 等<sup>[20]</sup>研究认为可能由于早三叠世正处于全球无煤时期,植被缺乏,风化作用较强,更多壳源锶被带入海洋,因此形成高的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值。黄思静等<sup>[21]</sup>认为可能是由于二叠—三叠纪生物灭绝事件后的生态空白,尤其是全球古陆植被缺乏,在没有植被保护下的地表侵蚀作用加剧,导致  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值增高。飞仙关组样品 Sr 同位素比值与全球海平

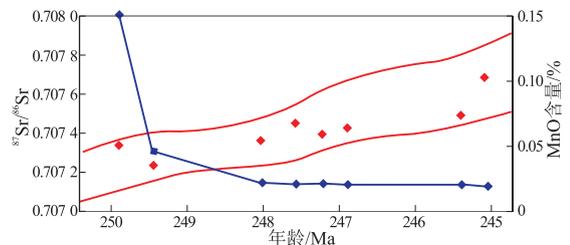


图 3 四川盆地飞仙关组样品的 Sr 同位素图解和 Mn 含量变化

Fig.3 Sr isotopes and Mn contents sampled from the Feixianguan Formation, Sichuan Basin

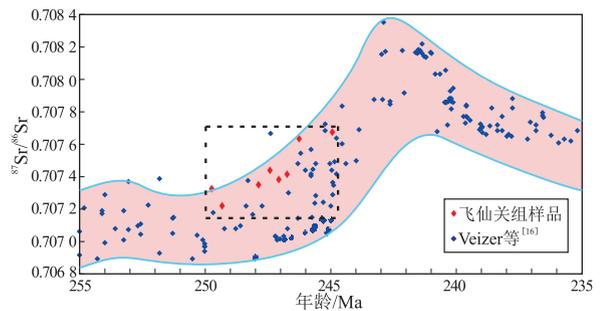


图 4 四川盆地飞仙关组样品  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值及在 Veizer<sup>[18]</sup> 全球  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  曲线上的位置

Fig.4  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  values sampled from the Feixianguan Formation, Sichuan Basin, and plots in Veizer's curve of global  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  values

面上升一致,受控于早三叠世的全球事件。

MnO 含量总体上表现为下降的趋势(图3)。MnO 或  $Mn^{2+}$  常富集在深水区,且作为离岸远近的指标,可用于推测相对古水深<sup>[8]</sup>。Mn 含量与古水深的变化有联系,二者表现为正相关关系<sup>[9]</sup>,因此认为研究区在该时期处于海平面下降期,这与早三叠世全球海平面上升不一致。推测是由于受到了区域构造运动的影响,中国南方大陆的海平面变化与全球海平面变化有所不同<sup>[22]</sup>。川东北地区位于中上扬子板块的北部,其北部边缘为南秦岭构造带,因此区域的构造活动受到该构造作用的影响<sup>[23]</sup>。二叠纪,南秦岭发生最大的裂陷作用,从早三叠世开始由开裂逐渐转变为收缩<sup>[24]</sup>。所以早三叠世研究区整体的相对海平面是呈下降趋势。

### 3.3 碳、氧同位素变化

Haq 等<sup>[19,25-26]</sup>认为层序、亚层序、准层序组、准层序分别对应三级—六级海平面变化旋回。根据野外剖面的沉积地质研究,飞一段—飞二段共划分出2个四级海平面变化旋回,并进一步划分出5个五级海平面变化旋回(图5),C、O 同位素值的变化与其有很好的耦合关系。

pss1—pss2 沉积期,川东北地区出现局部的海侵,发育退积型准层序组。总体为较深水的陆棚相沉积,岩性以薄层泥晶灰岩、粉晶灰岩等为主,反映低能的沉积环境。pss1 和 pss2 分别对应的2个五级海平面变化旋回构成一个四级海平面变化旋回。2个  $\delta^{13}C$  上升旋回可叠加成一个大的上升旋回,在 pss2 的顶界面达到最大值; $\delta^{18}O$  总的表现为下降旋回。反映了海平面的上升,并在 pss2 顶部达到最大值。这与野外观察所划分的一致,pss2 顶界面不仅代表了最大海泛面,且还是海侵体系域与高位体系域的分界线。

pss3—pss4 沉积期,海平面上升速率减慢,并呈现下降趋势,形成进积型的准层序组。为台前缓坡相沉积,岩性组合包括了泥晶或粉晶灰岩、含鲕粒泥晶灰岩、粉晶或细晶白云岩等。pss3—pss4 分别对应2个五级海平面变化旋回。 $\delta^{13}C$  曲线在这一沉积期,表现为2个下降旋回,总体为明显的下降趋势, $\delta^{18}O$  表现为2个上升小旋回,总体趋势基本不变。反映自飞一段沉积中期开始,海平面开始进入下降期,并从海侵体系域向高位体系域过渡。

pss5 沉积期,总体以台地边缘浅滩沉积为主,并发育了进积型的、以鲕粒滩为主的准层序组。 $\delta^{13}C$  为一个下降旋回,之后持续下降, $\delta^{18}O$  曲线总体趋势几乎不变,也反映了在飞二段沉积期,海平

面是持续下降的。pss3, pss4, pss5 分别对应的五级旋回可构成一个大的四级海平面变化下降旋回。

通过上文的野外层序划分与C、O 同位素分析的对比可以看出,C、O 同位素变化曲线与层序发育和总体海平面变化趋势有很好的对应关系。飞一段下部, $\delta^{13}C$  呈上升趋势,与海平面上升时期相对应,发育海侵体系域。碳酸盐沉积物的堆积速率没有海平面上升的幅度大,造成台地的淹没。岩性上主要以灰岩为主,灰岩在每个准层序组中占较大比重,部分层段沉积砂屑灰岩。飞一段上部到飞二段, $\delta^{13}C$  呈下降趋势,与海平面下降时期相对应,发育高位体系域。水动力较强的条件下逐渐形成了鲕粒滩,并随着规模的扩大,开始侧向发展,形成进积型的鲕粒滩。下部准层序组发育泥晶灰岩,向上泥晶灰岩厚度逐渐变小,岩性自下而上也从泥晶灰岩、粉晶灰岩过渡到上部准层序组的鲕粒灰质白云岩和鲕粒白云岩。

从上述分析中,C、O 同位素与海平面变化存在耦合关系。在自然界中,一般认为在埋藏量大于氧化量的情况下, $^{12}C$  更多的趋向于进入埋藏的有机碳中,导致同一时期海相碳酸盐岩的  $\delta^{13}C$  值增大,反之则减小。而海平面升降与有机质的埋藏量呈正相关,因此, $\delta^{13}C$  增加表明海平面上升<sup>[27]</sup>。对于氧同位素而言,海平面下降,蒸发作用增强, $\delta^{18}O$  值增高,因此一定程度上氧同位素与海平面变化呈负相关关系。碳同位素变化与海平面的变化关系密切,而氧同位素相对容易受成岩作用影响,因此其对海平面变化的响应过程较为复杂,导致个别层段对应关系不是特别明显。

## 4 海平面变化对储层物性的影响

飞一段至飞二段的部分样品进行了测试,孔隙度介于0.03%~3.10%之间,平均孔隙度为0.86%;渗透率为 $(0.003\sim 0.006)\times 10^{-3} \mu m^2$ ,平均渗透率为 $0.004\times 10^{-3} \mu m^2$ 。可见大部分样品的孔隙度和渗透率都不高,构造裂隙和后期溶洞不发育的岩层一般属于低孔低渗储层。

鲕滩形成时的成岩环境以及后期成岩流体性质都直接受海平面变化的影响,并且成为控制鲕滩白云石化最主要的因素。海平面下降时,鲕滩被暴露,并受到大气淡水的作用,发生混合水白云岩化。海平面上升,生成的鲕粒滩被海水浸没,发生早期胶结作用<sup>[28]</sup>。因此认为在构造活动较弱的情况下,海平面下降期,更有利于改善储层物性。海平面下降,白云石化加剧,白云岩化作用是增大孔隙

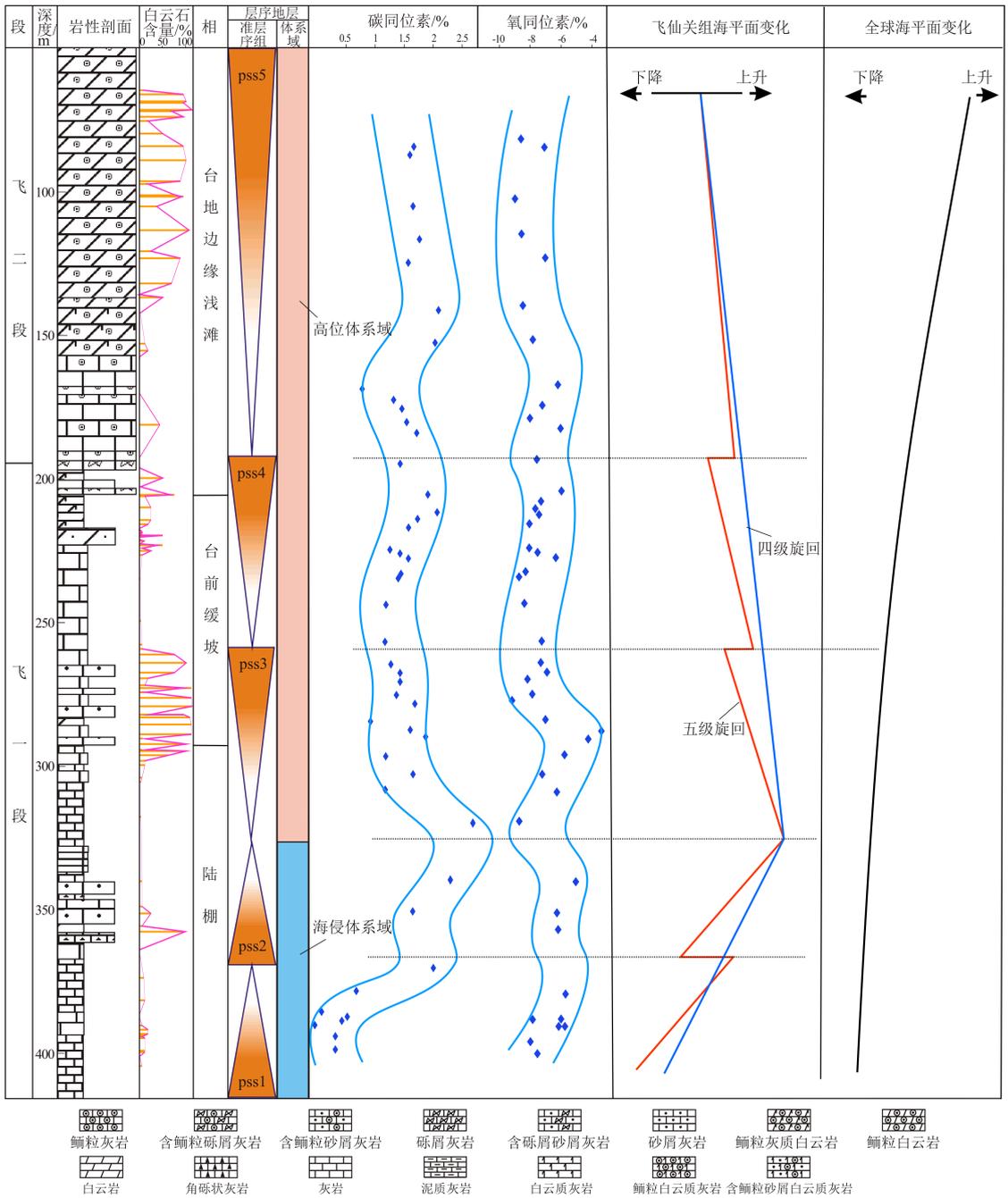


图 5 四川盆地飞仙关组样品的 C、O 同位素变化曲线与对应的海平面变化  
全球海平面变化曲线据 Haq<sup>[19]</sup>

Fig.5 Envelope curves of carbon and oxygen isotopes sampled from the Feixianguan Formation, Sichuan Basin, and correspondent sea level fluctuations

的最重要因素。

研究区段有 2 个时期白云石含量显著上升,一个是飞一段沉积中期,另一个是飞二段沉积的晚期(图 5),这 2 个时期白云石含量的增加可能是因为混合水白云岩化和埋藏白云岩化的作用。

飞仙关组一段下部海平面快速上升,出现局部海侵。这一时期主要发生早期胶结作用,形成的颗粒细小,原始孔隙度也小。构造活动相对活跃,水深变化较大,因此没有形成具有一定规模的鲕滩。

这一层段的孔渗性也较差。

飞一段中期起海平面上升缓慢,并逐渐转为下降趋势,台地局部暴露并伴有大气淡水淋滤,少数几个落在大气淡水环境区域的样品也出现在这一时期,但多数样品都是落在海水成岩环境区域(图 2)。因此飞一段中期,主要发生混合水白云岩化作用,但是这一过程持续较短,白云岩化作用形成鲕粒白云岩和晶粒白云岩,导致这一层段白云石含量上升。由于混合水白云岩化时间较短,产生的

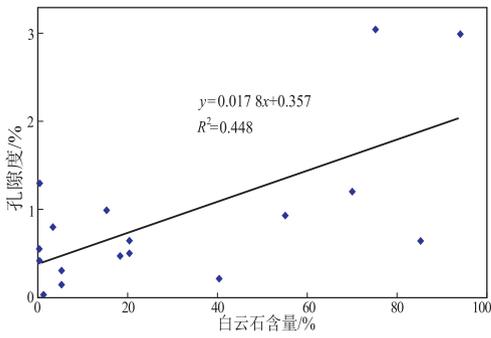


图6 四川盆地飞仙关组样品孔隙度与白云石含量交会图

Fig.6 Cross-plots of dolomite contents and porosity sampled from the Feixianguan Formation, Sichuan Basin

孔隙有限,因此飞一段整体的物性都较差。

进入飞二段沉积期,海平面大幅下降,从渡口河到鸡唱,广泛发育了巨厚的鲕粒滩。埋藏阶段早期,发生重结晶作用,只形成极少量白云石,晚期发生埋藏白云岩化作用,导致飞二段顶部白云石含量显著上升。白云石含量与孔隙度呈正相关关系(图6)。白云石的交代作用导致矿物体积的缩小,从而形成储集空间。样品测试结果显示,飞二段的孔渗性也较差。陈梅等<sup>[29]</sup>认为飞二段孔渗性较差的原因是受到其他成岩作用,如胶结、压实、重结晶等的影响,这些作用破坏了有限的次生孔隙和原生孔隙。

## 5 结论

(1)  $\delta^{13}C$  值范围都在  $\pm 5\text{‰}$ ,  $\delta^{18}O$  值都大于  $-10\text{‰}$ , Mn/Sr 比值小于  $2\text{‰}$ , 表明样品保持了原始沉积、成岩环境特征,没有受到后期的改造。

(2)  $^{87}Sr/^{86}Sr$  曲线表现为逐渐上升的趋势,与全球的锶同位素变化趋势一致。MnO 表现为逐渐下降趋势,这种趋势与川东北局部海平面总体下降趋势相一致。

(3) C、O 同位素变化曲线与高频的层序划分相一致,较好地反映相对的海平面变化。C、O 同位素的增加与减少与海平面变化大致是对应的,海平面上升,  $\delta^{13}C$  增加,  $\delta^{18}O$  减少。本文共划分了5个五级海平面变化旋回和2个四级海平面变化旋回,  $\delta^{13}C$  比  $\delta^{18}O$  曲线在反映海平面变化上更灵敏。

(4) 受到海平面变化的影响,白云石和鲕粒滩大规模发育于海平面下降期,白云石显著上升的层段可能发生了混合水白云岩化作用和埋藏白云岩化作用,白云石含量与孔隙度呈正相关关系,白云石化有利于储层物性的改善。

## 参考文献:

[1] 杜小弟,刘万洙,王东坡.碳氧同位素与海平面变化:以新疆柯坪地区上震旦统一奥陶系碳氧同位素剖面为例[J].世界地质,1994,13(3):120-123.  
Du Xiaodi, Liu Wanzhu, Wang Dongpo. Carbon, oxygen isotope and sea level changes: A case study of  $\delta^{13}C$ ,  $\delta^{18}O$  section of Upper Sinian to Ordovician in Keping area, Xinjiang[J]. Global Geology, 1994, 13(3): 120-123.

[2] 李宝庆.现行层序模型及其标准化[J].石油实验地质,2015,37(2):134-140.  
Li Baoqing. Current models and standardization of sequence stratigraphy[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 134-140.

[3] 李小宁,黄思静,黄可,等.沉积条件下白云石与伴生方解石碳氧同位素组成的差别及影响因素[J].石油实验地质,2016,38(6):828-835.  
Li Xiaoning, Huang Sijing, Huang Ke, et al. Differences and controls of carbon and oxygen isotope composition in dolomite and coexisting calcite under deposition conditions [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(6): 828-835.

[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):1-5,21.  
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, 21.

[5] Stemmerik L, Magaritz M. Carbon isotope variations in the Upper Carboniferous-Permian Mallek Mountain Group, eastern North Greenland[J]. Bulletin of the Geological Society of Denmark, 1989, 37: 205-211.

[6] 田景春,曾允孚.中国南方二叠纪古海洋锶同位素演化[J].沉积学报,1995,13(4):125-130.  
Tian Jingchun, Zeng Yunfu. The revolution of the isotopic composition of strontium in the Permian Paleo-ocean in South China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995, 13(4): 125-130.

[7] 郑荣才,刘文均.龙门山泥盆纪层序地层的碳、锶同位素效应[J].地质论评,1997,43(3):264-272.  
Zheng Rongcai, Liu Wenjun. Carbon and strontium isotopic effects of the Devonian sequence in the Longmen Mountains area[J]. Geological Review, 1997, 43(3): 264-272.

[8] 鲍志东,朱井泉,江茂生,等.海平面升降中的元素地球化学响应:以塔中地区奥陶纪为例[J].沉积学报,1998,16(4):32-36.  
Bao Zhidong, Zhu Jingquan, Jiang Maosheng, et al. Isotope and trace element evolution responding to sea-level fluctuation: An example of Ordovician in middle Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(4): 32-36.

[9] 高志前,樊太亮,李岩,等.塔里木盆地寒武-奥陶纪海平面升降变化规律研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2006,36(4):549-556.  
Gao Zhiqian, Fan Tai liang, Li Yan, et al. Study on eustatic sea-level change rule in Cambrian-Ordovician in Tarim Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006,

- 36(4):549-556.
- [10] 胡峰.川东北地区飞仙关组构造演化与油气成藏关系研究[D].成都:西南石油大学,2015:1-69.  
Hu Feng.Research on structural evolution and oil and gas reservoiring of Feixianguan Formation in northeast Sichuan basin [D]. Chengdu:Southwest Petroleum University,2015:1-69.
- [11] 牟传龙,马永生,余谦,等.四川宣汉盘龙洞生物礁古油气藏油气源分析[J].石油实验地质,2005,27(6):570-574,582.  
Mou Chuanlong, Ma Yongsheng, Yu Qian, et al. The oil-gas sources of the Late Permian organic reefal oil-gas pools in the Panlongdong, Xuanhan, Sichuan [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27(6):570-574, 582.
- [12] 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):11-21.  
Chen Rongkun. Application of stable oxygen and carbon isotope in the research of carbonate diagenetic environment [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(4):11-21.
- [13] Wendte J, Qing Hairuo, Dravis J J, et al. High-temperature saline (thermoflux) dolomitization of Devonian Swan Hills platform and bank carbonates, Wild River area, west-central Alberta [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1998, 46(2):210-265.
- [14] Saller A H. Petrologic and geochemical constraints on the origin of subsurface dolomite, Enewetak Atoll: An example of dolomitization by normal seawater [J]. Geology, 1984, 12(4):217-220.
- [15] Kaufman A J, Knoll A H. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater; Stratigraphic and biogeochemical implications [J]. Precambrian Research, 1995, 73(1/4):27-49.
- [16] 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 地球科学), 2008, 38(3):273-383.  
Huang Sijing, Qing Hairuo, Huang Peipei, et al. Evolution of strontium isotopic composition of seawater from Late Permian to Early Triassic: Based on study of marine carbonates, Zhongliang Mountain, Chongqing, China [J]. Science in China (Series D Earth Sciences), 2008, 51(4):528-539.
- [17] Wickman F E. Isotope ratios: A clue to the age of certain marine sediments [J]. The Journal of Geology, 1948, 56(1):61-66.
- [18] Veizer J, Hoefs J. The nature of  $O^{18}/O^{16}$  and  $C^{13}/C^{12}$  secular trends in sedimentary carbonate rocks [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1976, 40(11):1387-1395.
- [19] Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic [J]. Science, 1987, 235(4793):1156-1167.
- [20] Korte C, Kozur H W, Bruckschen P, et al. Strontium isotope evolution of Late Permian and Triassic seawater [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003, 67(1):47-62.
- [21] 黄思静, 孙治雷, 吴素娟, 等. 三叠纪全球海水的锶同位素组成及主要控制因素 [J]. 矿物岩石, 2006, 26(1):43-48.  
Huang Sijing, Sun Zhilei, Wu Sujuan, et al. Strontium isotope composition and control factors of global seawater in Triassic [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2006, 26(1):43-48.
- [22] 刘宝珺, 许效松, 潘杏南, 等. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.  
Liu Baojun, Xu Xiaosong, Pan Xingnan, et al. The sedimentary crustal evolution and mineralizing of South China paleocontinent [M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [23] 杜远生, 殷鸿福, 王治平. 秦岭造山带晚加里东—早海西期的盆地格局与构造演化 [J]. 地球科学(中国地质大学学报), 1997, 22(4):403-404.  
Du Yuansheng, Ying Hongfu, Wang Zhiping. The Late Caledonian—Early Hercynian Basin's framework and tectonic evolution of Pattern of the basin and tectonic evolution of Qinling orogenic belt [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 1997, 22(4):403-404.
- [24] 罗志立. 地裂运动与中国油气分布 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1992:11-78.  
Luo Zhili. The relationship between oil and gas distribution and crack movement [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992:11-78.
- [25] Leven E J. Main events of Tethyan Permian history and fusulinids [J]. Permian, 1992, 20:23-25.
- [26] Williams D F. Evidence for and against sea-level changes from the stable isotopic record of the Cenozoic [M]//Wilgus C K, Hastings B S, Posamentier H, et al. Sea-level changes: An integrated approach. Society for Sedimentary Geology, Special Publication, 1988, 42(1):31-36.
- [27] 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.
- [28] 陈辉, 田景春, 张翔, 等. 川东北地区下三叠统飞仙关组鲕滩白云岩成因 [J]. 天然气工业, 2008, 28(1):42-46.  
Chen Hui, Tian Jingchun, Zhang Xiang, et al. Dolomitization genetic of the Lower Triassic Feixianguan Group oolitic beach in northeast Sichuan basin [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(1):42-46.
- [29] 陈梅, 王龙樟, 张雄, 等. C, O 同位素在川东北碳酸盐岩储层研究中的应用 [J]. 沉积学报, 2011, 29(2):217-225.  
Chen Mei, Wang Longzhang, Zhang Xiong, et al. Application of carbon and oxygen isotope to carbonate reservoirs in Northeast Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(2):217-225.

(编辑 黄娟)