

四川盆地晚震旦世古海洋环境恢复及地质意义

罗贝维¹ 魏国齐² 杨 威² 董才源¹

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北 廊坊 065007)

摘要: 基于四川盆地灯影组 3 个采样点 69 组碳氧同位素样品测试分析, 在充分论证样品有效性的基础上, 对研究区碳氧同位素特征展开分析, 进而探讨对应的古海洋环境及地质学意义。四川盆地灯影组白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在 -2.85‰ ~ 4.44‰ , 平均值为 1.8‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -9.02‰ ~ -1.90‰ , 平均值为 -5.42‰ , 碳氧同位素整体变化趋势与中国扬子地台其他区域基本相同。古海洋环境恢复表明, 震旦纪灯影期研究区整体处于海相环境; 灯影期海水温度主要介于 $15\sim 30\text{℃}$ 之间, 属温暖或炎热的亚热带气候; 海平面共经历了缓慢海进、低位振荡海退、高位振荡海退、短暂海进、持续海退、振荡海退六个阶段。在海平面升降、气候变化、构造运动以及火山活动等众多因素的影响下, 灯影组白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值共出现 4 次负漂移($N_1\sim N_4$)和 2 次正漂移($P_1\sim P_2$); 受古海洋环境的影响, 盆地沉积了特征明显的灯二段葡萄状藻云岩、灯三段暗色碎屑岩以及灯四段富藻云岩。

关键词: 碳氧同位素; 古海洋环境; 地质意义; 灯影组; 晚震旦世; 四川盆地

中图分类号: P736.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000 - 3657(2013)04-1099-13

海相沉积环境中, 海洋环境不仅影响沉积岩石的类型、成分、元素组成, 也对海洋生产力、地质作用过程有重要影响。研究表明, 稳定碳氧同位素分析作为研究古海洋环境特征的重要手段, 不仅能有效地分析古海洋的温度、盐度、海平面变化^[1-3], 同时也有助于地质分层、岩石组成分析等工作的开展^[4,5]。四川盆地震旦系灯影组作为中国最古老的海相勘探层系, 从 20 世纪 50 年代中期开始就备受关注, 但受勘探程度的影响, 研究相对集中在 20 世纪 60 年代的威远气田的基础之上, 也使得前人针对晚石炭世碳氧同位素特征的研究仅关注灯影组顶底的 $\delta^{13}\text{C}$ 负漂移^[6-8], 而缺少针对灯影组内部地层碳氧同位素特征的探讨。因此, 我们有必要借助同位素分析这一手段, 针对灯影组碳氧同位素特征进行系统分析, 以进一步还原晚震旦世古海洋环境, 反演地质过程, 进而指导震旦系油气勘探的开展。

笔者选择四川盆地震旦系灯影组碳酸盐岩进行碳氧同位素分析, 研究区覆盖了乐山—龙女寺古隆

起的核部, 通过系统采样和实验数据的全面分析, 阐明了灯影组碳氧同位素变化特征, 分析了晚震旦世的古气候和古海洋环境, 并对其地质学意义进行探讨。

1 研究区概况

四川盆地位于中国四川省东部, 四面环山 (图 1), 面积约 $18\times 10^4\text{ km}^2$ 。从大地构造位置来看, 盆地位于扬子准地台西北一侧, 是在晚三叠世叠覆于上扬子碳酸盐岩台地之上的前陆盆地^[9]。目前, 四川盆地正处于储量增长的高峰期和大油气田发现的关键期, 特别是 2011 年 7 月高产气井——高石 1 井的钻探成功, 更进一步促进了针对以震旦系灯影组为主的碳酸盐岩地层的勘探进程。前人针对震旦系的研究主要是围绕乐山—龙女寺古隆起开展, 该古隆起是一个继承性的巨型隆起, 形成于志留纪末, 一直延续到二叠纪前的加里东运动, 使二叠系以下地层均遭受了不同程度的剥蚀或缺失^[10,11](图 1)。

收稿日期: 2012-10-25; 改回日期: 2013-05-06

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05007-002)资助。

作者简介: 罗贝维, 男, 1986 年生, 博士生, 构造地质学专业; E-mail: luobw-1216@163.com。

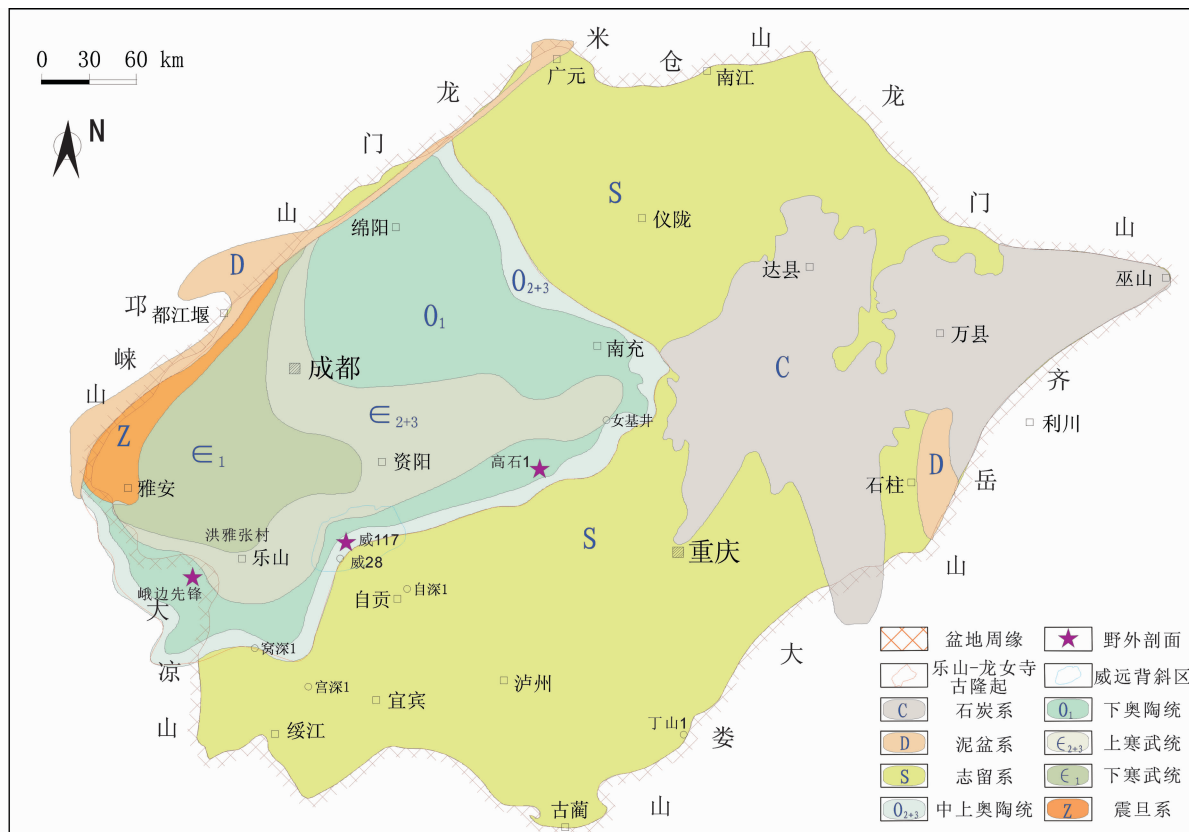


图 1 四川盆地二叠纪古地质图及样品位置

Fig.1 Paleo-geologic map of Permian in Sichuan basin and sampling locations

震旦系灯影组地层在整个盆地均有分布，地层厚度整体有由东向西逐渐减薄的趋势。受乐山—龙女寺古隆起影响，威远—资阳地区地层遭受剥蚀，厚度在 600~700 m；川中地区灯影组地层厚度在 800~900 m；由于沉积相带变化的影响，灯影组在乐山、窝深 1 井、丁山 1 井附近沉积厚度较大，厚度可达 1100 m。

灯影内部地层由上至下分为四段(图 2)。从地层接触关系上来看，受澄江运动和桐湾运动影响，灯影组分别与下伏陡山沱组 and 上覆寒武系筇竹寺组呈角度不整合接触；受桐湾 I 幕构造运动的影响，盆内在灯二、灯三段之间存在区域性的角度不整合。

从岩性类型来看，研究区以富藻细粒沉积为特征，其中，灯二和灯四段是富藻段，主要为泥(粉)晶藻云岩，常见葡萄状、雪花状等构造，并以灯二段发育最为广泛。灯一段主要为贫藻的泥粉晶白云岩为主，下部见少量含角砾的云岩；灯二段发育大量葡萄花边构造，其中葡萄状藻云岩由于特征明显，在盆地

广泛分布，在地层分层对比上也有一定意义。灯三段主要发育一套黑色、灰色的碎屑岩，在测井曲线上表现出明显的高伽马特征；该段在整个区域厚度较薄，例如在先锋剖面表现为一套 36 cm 的灰黑色或者蓝灰色泥岩，高石 1 井为一套不足 70 m 的灰、黑、蓝灰色泥岩夹薄层白云岩。灯四段岩性主要为浅灰色层状白云岩、藻白云岩，常在粉细晶云岩之中夹有硅质条带。

2 样品分析与有效性评价

2.1 样品分析

在对研究区地质背景认识的基础上，本次研究针对震旦系灯影组野外剖面和两口关键井进行系统采样(采样位置见图 1)。为确保样品能尽量反映原始沉积环境，灯四段主要采集富藻云岩、粉(细)晶云岩(图 3-a1,3-a2)以及含微量硅质成分的白云岩；灯三段主要采集其顶部或灯四段底部的泥质云岩(图 3-b1,3-b2)；灯二段主要采集(泥)细晶云岩以

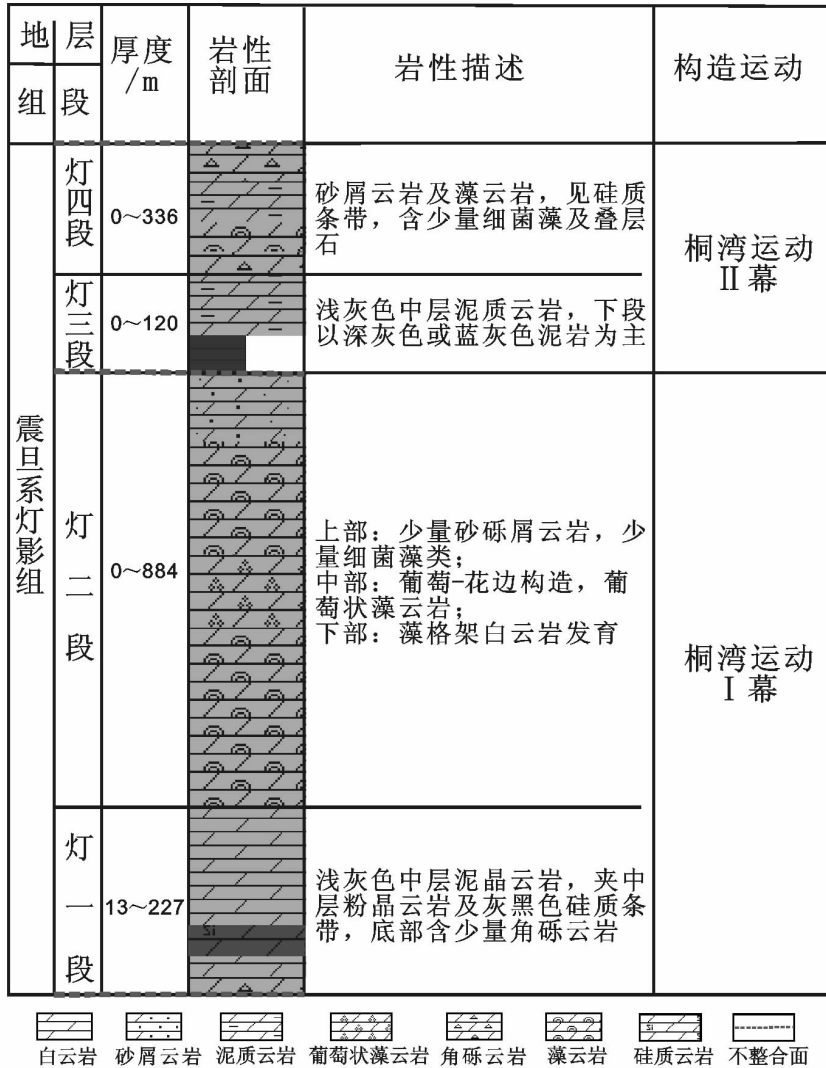


图 2 四川盆地震旦系灯影组地层综合柱状图

Fig.2 Synthetic stratigraphic histogram of Simian Dengying Formation, Sichuan basin

及葡萄状藻云岩 (图 3-c1,3-c2); 灯一段则以泥(粉)晶云岩为主(图 3-d1,3-d2)。同时,为降低后期成岩蚀变作用的干扰,采样时避开后期风化、重结晶和方解石脉等发育部位(图 3-a1,3-c1),并在薄片观察过程中,对样品中成岩变化部分进行剔除(图 3-c2)。

白云岩碳氧同位素样品在西南油田研究院分析化验室测试完成,采用磷酸法制备 CO₂ 气体,在 Finnigan MAT252 型稳定同位素质谱仪上分析其碳氧同位素值,实验温度为 19~22℃,湿度为 49%~51% RH,所获得的 δ¹³C 和 δ¹⁸O 以 PDB 为标准,分析误差小于 0.2‰。实验最终获得有效分析数据 69 组,其中峨边先锋剖面 17 组,威 117 井 16 组,高石 1 井

36 组。

2.2 有效性评价

为论证碳酸盐岩是否保留原始的同位素组成,必须在分析工作之前针对碳酸盐岩稳定同位素开展有效性评价的工作^[12]。尽管前人对四川盆地灯影组白云岩的成因存在争议,但目前普遍认为研究区大面积发育的富藻云岩、泥—粉晶云岩为原生或准同生成因,受成岩蚀变作用影响较小,保留了较多的古海水原始信息^[13-15]。另外,根据分析化验数据,所有样品的 δ¹⁸O > -10‰,表明样品的 δ¹⁸O 基本保留了原始的沉积信息^[16]。但为了更进一步说明测试数据的可用性,笔者综合 Mn/Sr、δ¹³C 值与 δ¹⁸O 值相关性对样品的有效性进行评价。

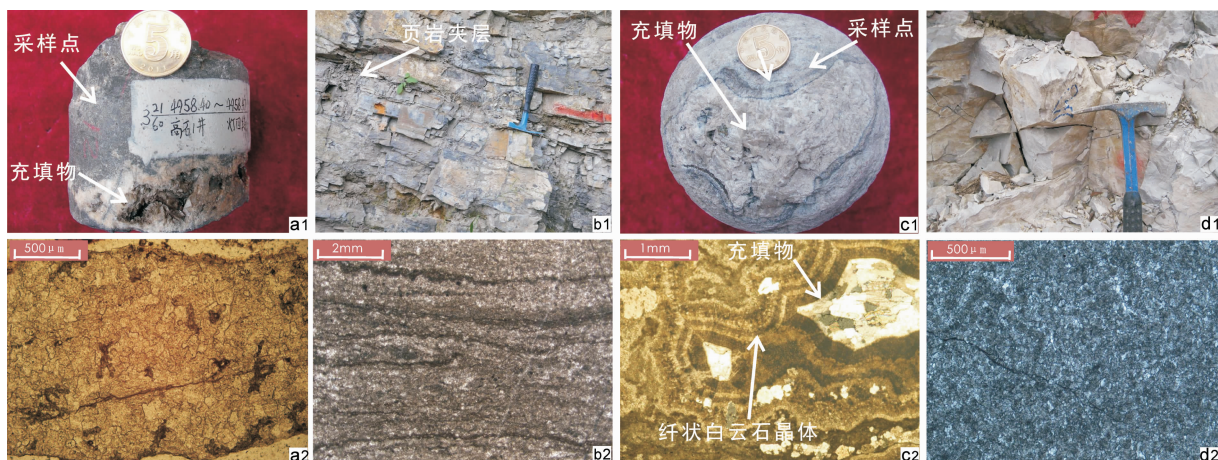


图3 震旦系灯影组采样点照片及显微照片

a1—高石1井,灯四段,4 985.4 m;灰黑色云岩,溶洞被白云岩、石英半充填;a2—高石1井,灯四段,4 985.4 m;粉晶云岩,充填沥青(-); b1—先锋剖面,灯四段底部;灰色中薄层状粉晶云岩,内部夹1~2 cm厚的灰黑色页岩;b2—先锋剖面,灯三段;泥质粉晶云岩,水平层理发育(-); c1—威117井,灯二段,3 122.7 m;葡萄状藻云岩,白云石、石英全充填;c2—威117井,灯二段,3 122.7 m;藻云岩,发育纤状白云石胶结物(-); d1—先锋剖面,灯一段;灰色块状泥晶-粉晶云岩,发育少量硅质条带;d2—先锋剖面,灯一段;泥晶云岩,致密(-)

Fig.3 Photographs and microphotographs showing characteristics of sampling locations

(a1) Ash black dolomite, dolomites and quartz semi-filled in cave; (a2) Micritic dolomite, filled with asphalt (-); (b1) Gray thin-bedded micritic dolomite, interbedded black shale; (b2) Argillaceous micritic dolomite, well developed horizontal bedding (-); (c1) Grape-shaped algal dolomite, quartz fully-filled in cave; (c2) Algal dolomite, fibrous dolomite as the cement (-); Gray bulk silt- and fine- crystalline dolomite, a few well developed siliceous bands; (d2) Silt-crystalline dolomite, tight (-)

受成岩作用及大气水循环的影响,沉积的碳酸盐岩中微量元素会发生Sr含量降低,而Mn含量升高。一般来说,前人常把Mn/Sr作为判定碳酸盐岩是否有效的指标^[17]。在此理论基础上,笔者在试验分析的69组样品中抽取了16个样品做了Mn、Sr含量测定,本次测试在核工业部北京地质研究院完成,测试分析结果列于表1。

表1中所有样品的Mn/Sr比值介于2.82~7.64之间,均小于10。同时,综合 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值的相关性来看,碳氧同位素组成分布较为离散,二者在先锋剖面、威117井和高石1井的相关度均小于0.1,分别为0.0693、0.0852和0.0992,二者之间不存在明显的相关性^[18](图4)。综合分析表明,样品的碳氧同位素组成受成岩及后期蚀变作用的影响程度较低,能够反映成岩的原始同位素信息。

3 碳氧同位素特征

从全区来看(表2),四川盆地震旦系碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在-2.85‰~4.44‰,平均值为1.8‰,绝大部分值落在0‰~4‰的范围内。 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布在-9.02‰~-1.92‰,平均值为-5.42‰,数据主要处于-8‰~-4‰。从垂向上的变化来看(图4),四川盆

地灯影组碳氧同位素均表现平稳,变化频率不大,变化趋势与中国扬子地台同期地层的碳氧同位素特征基本相同^[19-21];但可能受碳酸盐形成环境不同的影响,中国南方灯影组的 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值约为3‰, $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值约为-2‰^[22,23],均高于四川盆地的1.8‰和-5.42‰。

对比灯影组各段碳氧同位素特征,可知,灯二段的 $\delta^{13}\text{C}$ 在3个采样点均表现出最高值,特别是在先锋剖面,灯二段 $\delta^{13}\text{C}$ 均值高达2.35‰,高于灯三、四段的0.99‰和灯一段的0.69‰;氧同位素组成特征性较弱,但也基本呈现出灯二段 $\delta^{18}\text{O}$ 均值最大的特点(威117井除外),例如,高石1井的 $\delta^{18}\text{O}$ 在灯一段和灯三、四段分别为-6.16‰和-6.33‰,均小于灯二段的-4.35‰。

根据碳氧同位素变化曲线及对比图来看(图5),四川盆地灯影组碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化具有比较明显的旋回性,具体特征如下:从灯一段底部至灯二段底部, $\delta^{13}\text{C}$ 值由负转正,持续升高,其中,高石1井变化幅度最大,由-2.85‰升高到2.94‰。灯二段 $\delta^{13}\text{C}$ 值在0‰~4‰的范围内振荡变化,经历了两次“升高—降低”的旋回,出现了两次正漂移(图5中的P1、P2)和一次负漂移(图5中的N2),受到剖面条

表 1 峨边先锋剖面、威 117 井、高石 1 井灯影组 Mn、Sr 含量
Table 1 Analytical data of Mn and Sr of Dengying Formation in Xianfeng section, Well-wei117, Well-Gaoshi1

采样点	样品号	岩性	地层	Mn/10 ⁻⁶	Sr/10 ⁻⁶	Mn/Sr
先锋剖面	XF2-50	粉晶云岩	灯四段	230	48.9	4.70
	XF2-2	泥质粉晶云岩	灯四段	310	88.3	3.51
	XF1-45	粉-细晶云岩	灯二段	180	51.2	3.52
	XF1-35	富藻云岩	灯二段	190	54.2	3.51
	XF1-17	富藻云岩	灯二段	180	37	4.86
	XF-27	泥晶云岩	灯一段	250	38.3	6.53
威117井	W117-2	粉晶云岩	灯四段	340	47.3	7.19
	W117-4	葡萄状藻云岩	灯二段	240	70.3	3.41
	W117-8	富藻云岩	灯二段	240	47.5	5.05
	W117-15	粉晶云岩	灯一段	160	55.7	2.87
高石1井	GS1-2	砂屑粉晶云岩	灯四段	540	86.2	6.26
	GS1-5	砂屑粉晶云岩	灯四段	350	124	2.82
	GS1-15	泥质粉晶云岩	灯三段	150	42.8	3.50
	GS1-21	葡萄状藻云岩	灯二段	540	70.7	7.64
	GS1-31	富藻云岩	灯二段	220	36.3	6.06
	GS1-41	泥晶云岩	灯一段	350	48.1	7.28

件的制约,先锋剖面只测试出一次正漂移,根据剖面
对比认为,所出现的正漂移应为第二次正漂移 P。灯
三段底部,出现了区域上可作对比的第三次负漂移
N3,相对于灯影组顶底的 N4 和 N1,此次波动在 3
个采样点都显示为较小的负值(-0.50‰(先锋),
-0.77‰(威 117),-0.52‰(高石 1))。进入灯四段
后,δ¹³C 值主体处于 0‰~4‰之间,仅在灯影组顶
部出现负值(-1.00‰(先锋))。

4 古环境恢复

对碳酸盐岩而言,碳和氧是自然界中两种最为
常见和丰富的同位素,由于原子序数小,当外界环境
的变化时,碳氧同位素具有更明显的差异^[24]。特别
是碳酸盐岩作为一种内源沉积岩,其碳氧同位素组成
及变化受到古海洋环境及后期地质作用过程等多因
素综合影响。目前,碳氧同位素更多用来开展恢复古
海洋温度、古海洋盐度、古海平面变化等古海洋环境
分析工作^[2,25]。

4.1 古海水温度

由于古海洋温度关系与 δ¹⁸O 更为密切,因此,
在盐度不变的情况下,δ¹⁸O 值是测定古海水温度

的可靠标志。

利用 δ¹⁸O 计算古海水温度的相关的经验公式^[2]:

$$t(°C) = 15.976 - 4.2 \delta^{18}O_{\text{caco}_3} + 0.13 (\delta^{18}O_{\text{caco}_3} + 0.22)^2 \dots\dots(\text{公式一})$$

利用该公式进行古温度分析往往更适用于中生
代以后的样品,而中生代以前样品常因成岩作用的
影响而可靠性较低,因此,我们必须针对灯影组
δ¹⁸O 值进行“年代效应”的校正^[25]。一般来说,年代
校正以第四纪海相碳酸盐岩的 δ¹⁸O 平均值
-1.2‰为标准,本次分析中,灯影组白云岩 δ¹⁸O 平
均值为 -5.42‰,二者差值为 -4.22,用 Δδ¹⁸O =
4.22‰,将灯影组白云岩的 δ¹⁸O 值矫正成相当于第
四纪样品的 δ¹⁸O 值,最后根据公式一计算古海水
温度,并把灯影组沉积各期古海水温度数据统计于
图 6。

通过统计,可知,震旦纪灯影期海水温度为 7.0~
38.6 °C,其中,约 62.3%的数据点分布在 15~30°C,占
绝大多数,说明当时该区主要为温暖或炎热的亚热带
气候,这一结论与古板块分析所揭示的扬子板块在新
元古代末期处于北纬 10°~15°的结论是一致的^[24]。

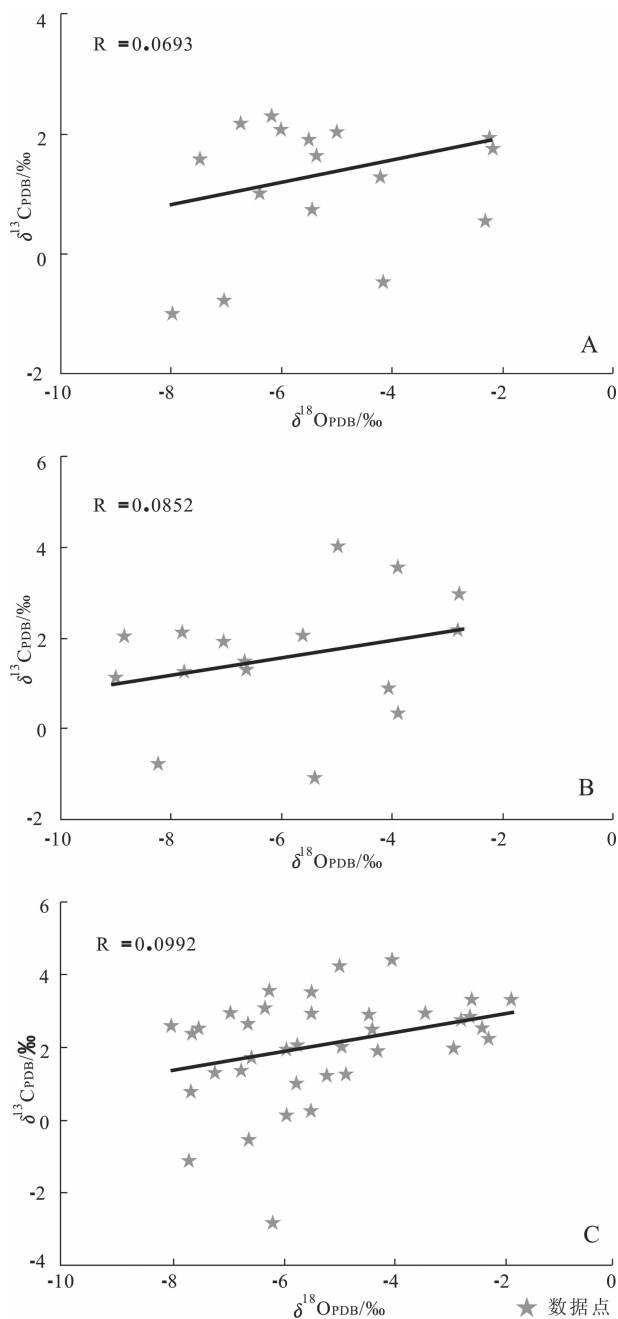


图4 峨边先锋剖面(A)、威117井(B)、高石1井(C)灯影组 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 相关图

Fig.4 Correlation between $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of Dengying Formation in Xianfeng profile, well-Wei117, well-Gaoshi1

从大的古气候背景来看,早震旦世陡山沱期,影响中国华南地区的 Marinoan 冰期已经结束^[27]。到了晚震旦世灯影期,整个四川盆地温度升高。具体从灯影各期海水温度来看:灯二段(图 6-B)沉积期海水温度最低(平均值:18.12°C),灯一段(图 6-A)沉积期海水温度稍高(平均值:20.54°C),灯三段(图

6-C)、灯四段(图 6-D)沉积期海水温度最高(平均值分别为 27.14°C和 25.75°C)。

4.2 古海洋盐度

$\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 都与古海洋的盐度有关,早在 1964 年,Keith 和 Weber 就提出利用石灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 区分侏罗纪及其之后的海相石灰岩和淡水相石灰岩的公式^[28]:

$$Z = 2.048 \times (\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498 \times (\delta^{18}\text{O} + 50) \dots\dots(\text{公式二})$$

式中的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 均用 PDB 标准,且不存在碳氧同位素的校正问题。并认为,当 Z 值大于 120 为海相石灰岩,Z 值小于 120 为淡水石灰岩。这一公式现已广泛的应用于中国元古界、古生界等碳酸盐岩地层的古盐度分析,均取得了很好的效果。通过该方法,笔者对研究区灯影期海水盐度进行了分析和对比(图 7)。

根据图 7 中 3 个采样点 Z 值的分析可知,除高石 1 井的一个数据点外,研究区灯影组 98.6%的白云岩 Z 值都>120,表明灯影期四川盆地整体处于海相环境。

整体上来看,各时期 Z 值变化曲线与碳酸盐岩碳同位素变化曲线变化基本一致,进一步说明 $\delta^{13}\text{C}$ 与古盐度关系最密切。同时,对比各时期 Z 值大小,可发现,灯四段 Z 值(平均值:128.32)和灯二段 Z 值(平均值:129.49)普遍都高于灯三段(平均值 125.18)和灯一段(平均值 125.34),表明灯四段、灯二段形成时介质环境的盐度要高于后者。

4.3 古海平面变化

从 20 世纪 80 年代开始,随着古海洋学研究工作的深入和氧同位素分馏机理方面的探讨,认为,对某一特定时期原生海相碳酸盐而言,当氧同位素已达到平衡分馏状态时,碳酸盐岩原始氧同位素组成将包含着古代海平面变化的重要信息,是确定海平面变化的一种重要手段。前人通过对比岩心的同位素记录与海平面变化,发现二者呈很好的负相关关系,并认为 $\delta^{18}\text{O}$ 每变化 1‰(0.995‰~1.1‰)相当于海平面变化 100 m^[29],这为精确分析古海平面变化提供了有力依据。

分析工作采用 $\Delta\delta^{18}\text{O}=1.1\text{‰}/100\text{ m}$ 为标准,根据 3 个采样点 $\delta^{18}\text{O}$ 变化规律,针对灯影期古海平面相对变化及特征进行研究。通过与岩相古地理分析获得的海平面变化对比可知(图 8),3 个剖面点推

表 2 峨边先锋剖面、威 117 井、高石 1 井灯影组碳氧同位素组成 (‰) 及统计
 Table 2 Compositions and Statistics of carbon and oxygen isotopes of Dengying Formation in Xianfeng section, Well-wei117, Well-gaoshi1

同位素组成	先锋剖面			威 117 井			高石 1 井			全区	
	Z ₂ dn ³⁺⁴	Z ₂ dn ²	Z ₂ dn ¹	Z ₂ dn ³⁺⁴	Z ₂ dn ²	Z ₂ dn ¹	Z ₂ dn ³⁺⁴	Z ₂ dn ²	Z ₂ dn ¹		
δ ¹³ C	Max	2.32	4.16	1.62	2.04	4.00	2.99	4.30	4.44	2.94	4.44
	Min	-1.00	1.80	-0.81	-0.77	0.35	-1.10	-0.52	0.29	-2.85	-2.85
	Ave	0.99	2.35	0.69	0.78	2.03	0.92	2.36	2.20	0.45	1.80
δ ¹⁸ O	Max	-2.34	-2.20	-4.25	-8.24	-2.82	-2.78	-4.49	-1.92	-5.25	-1.48
	Min	-8.00	-5.50	-7.05	-9.02	-7.80	-5.40	-8.07	-7.28	-7.00	-9.02
	Ave	-5.88	-4.74	-5.57	-8.71	-5.72	-4.09	-6.33	-4.35	-6.16	-5.46

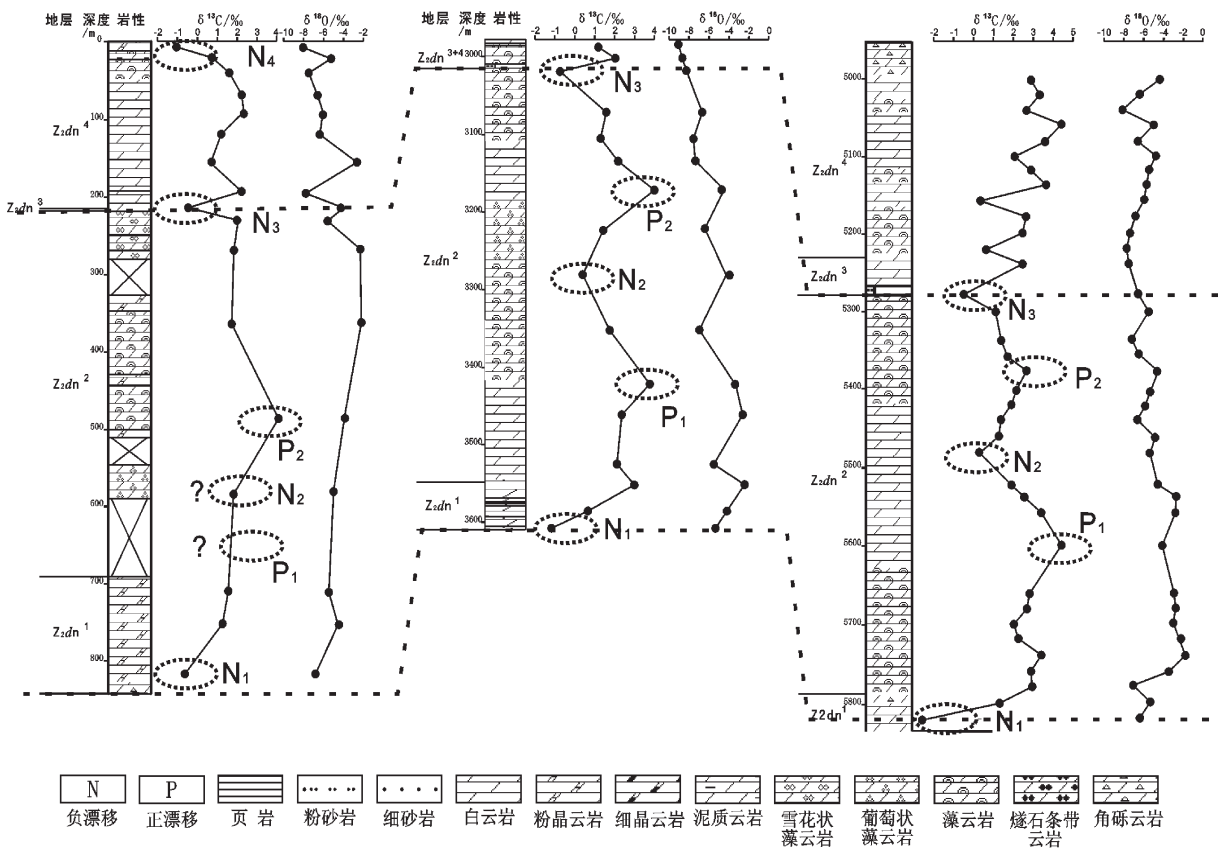


图 5 四川盆地灯影组碳酸盐岩碳氧同位素变化曲线及对比

Fig.5 Variation curves and correlation of C and O isotopes in Dengying Formation in Sichuan basin

断的海平面变化曲线均显示为振荡上升, 但受采样点密度影响, 仅在灯三与灯四段上段(B3、B1)、灯一与灯二段下段(B3、B2)之间存在较高的相似性(图 8)。为了更全面、精确地描述灯影期海平面变化事件, 笔者仅对数据点最多的高石 1 井展开分析, 并重点对其演化阶段进行刻画。

从灯影期开始, 海平面缓慢上升 (事件 s-1 至 s-2, 图 8)。灯二段沉积期海平面变化可以分为两个

阶段, 早期海水表现为低位振荡海退, 该阶段海水整体处于低位, 海平面变化幅度较小 (事件 s-4 至 s-7); 到了灯二段沉积中期, 海水发生了一次明显的海进过程 (事件 s-8), 此后, 海平面变化进入灯二段高位振荡海退阶段, 该阶段海水振荡幅度增大, 由事件 s-8 到 s-13 的三次海退过程中, 海水下降幅度均大于低位振荡海退阶段。到灯三段沉积期, 研究区发生了一次短暂的海侵 (事件 s-13 至 s-14), 本次海

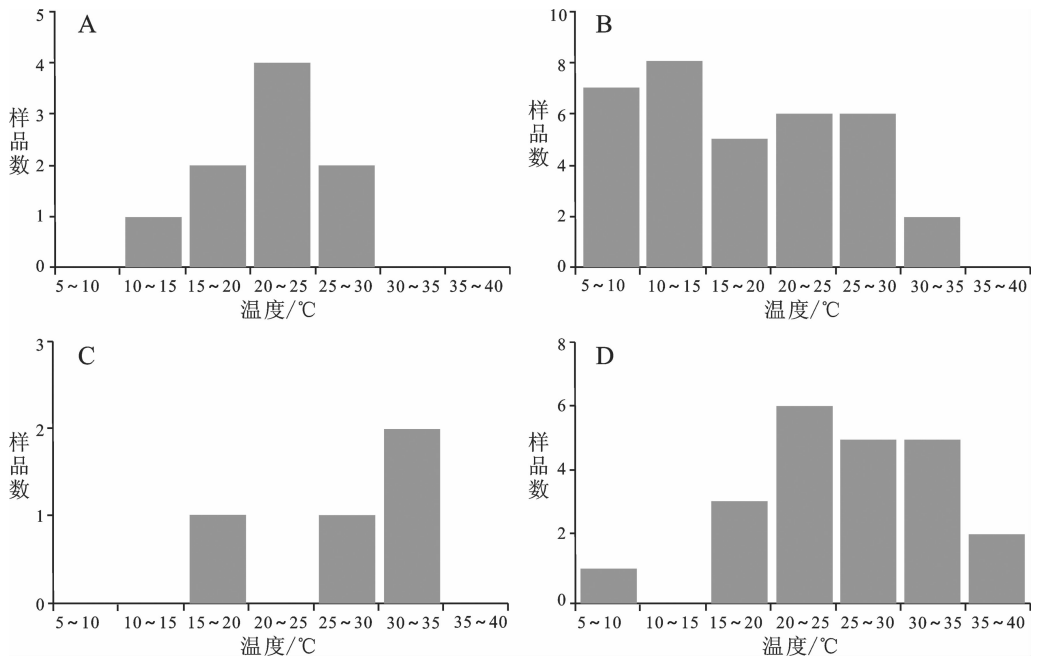


图 6 四川盆地灯影组各沉积期古海水温度统计图

Fig.6 Paleoseawater temperature charts of Dengying Formation, Sichuan basin

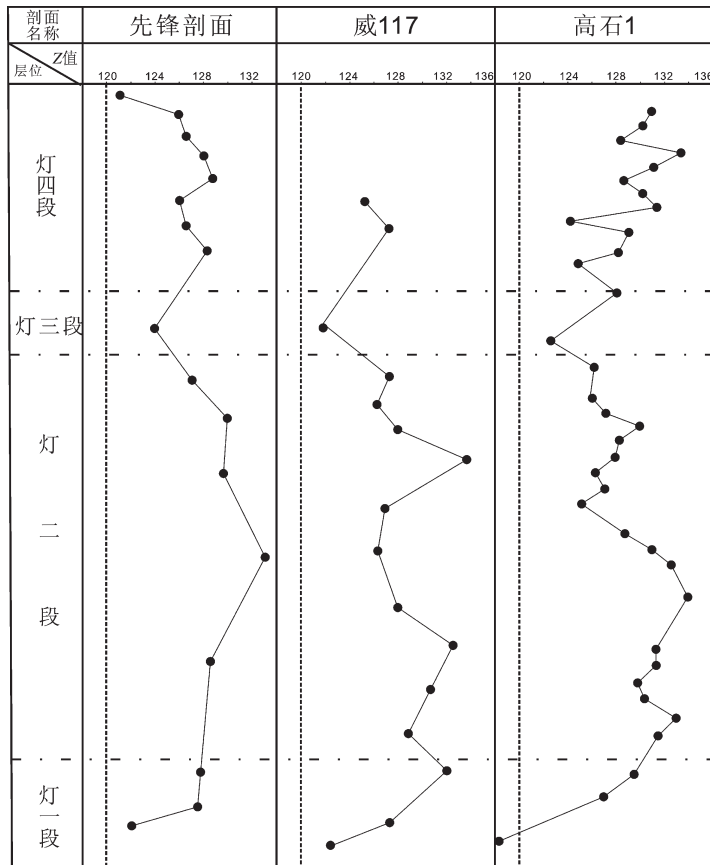
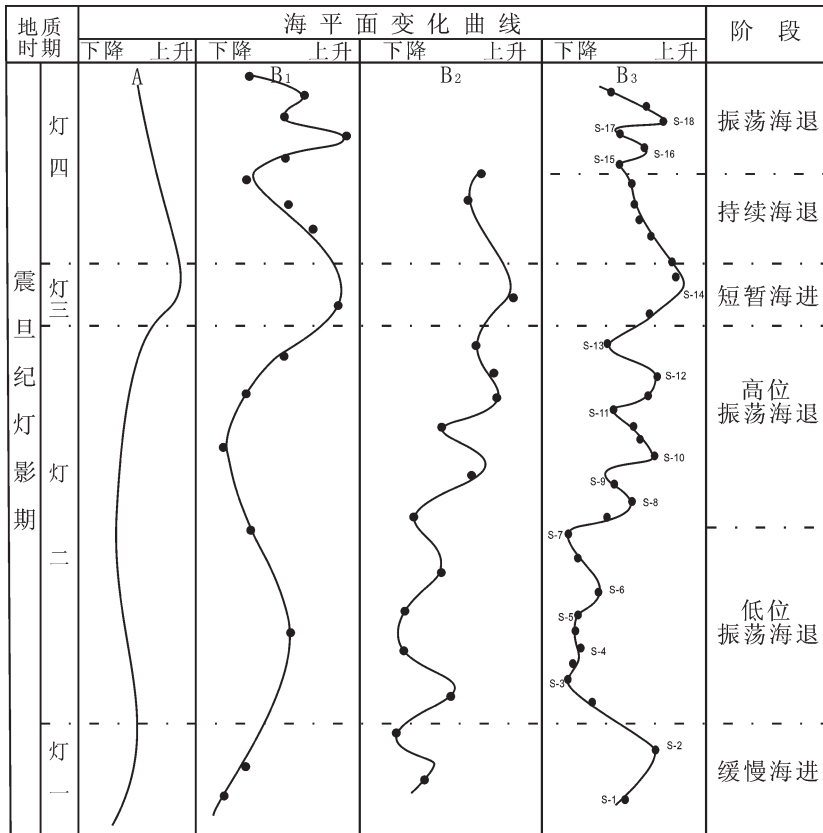


图 7 四川盆地灯影组碳酸盐岩 Z 值变化曲线及对比

Fig.7 Variation curves and correlation of Z values in Dengying Formation, Sichuan basin



注: A-岩相古地理分析获得的海平面变化曲线; B₁₋₃- $\delta^{18}O$ 分析获得的海平面变化曲线
 B₁-先锋剖面; B₂-威117井; B₃-高石1井;
 S-1~S-18:海平面升降事件编号(奇数代表海退,偶数代表海进)

图 8 四川盆地灯影期海平面变化曲线及阶段

Fig.8 Variation curves and stages of sea level in Dengying age, Sichuan basin

侵在野外和岩心上均表现为一套几十厘米厚的碎屑岩沉积,随后,海平面也随之进入下降周期。灯四段沉积初期,海水发生持续海退(事件 s-14 至 s-15),随后,海平面变化进入振荡海退阶段,该阶段发生了两次海平面的升降,由 s-17 到 s-18 海水上升后,海平面开始下降,灯影期随之结束。

由图 8 可见,依据 $\delta^{18}O$ 值推算的海平面变化特征与前人的观点基本一致。同时,氧碳同位素对级次低的海平面变化的更为详细,包含更多的信息,这些特征对分析古环境及地质作用过程都有积极作用。

5 地质学意义

碳酸盐岩中碳氧同位素组成的波动,不仅体现了古代海洋环境的变化,同样有助于我们推断地质作用过程^[30-31]、分析沉积充填特征等问题。

5.1 $\delta^{13}C$ 值的正、负漂移

灯影组顶底的 $\delta^{13}C$ 负漂移特征具有全球可对

比性(图 5 中的 N1 和 N4),同时,顶底两个负漂移分别被认为是震旦系与上覆寒武系筇竹寺组、灯影组与下伏陡山沱组的地层分界面^[22,32]。但本次研究中发现(图 5),除 N1 和 N4 两个负漂移外,灯影组内部地层还存在两个负漂移(N2 和 N3)和两次正向漂移(P1 和 P2)。一般认为, $\delta^{13}C$ 值的变化除受气候变化影响外,还受到生物是否繁盛以及后期成岩作用的影响。因此,在具体分析碳酸盐岩碳同位素正负漂移的原因时,需综合考虑海平面、气候、火山活动等众多因素的影响。

由于在灯一段底部和灯四段顶部均发现有暴露岩溶所产生的角砾云岩,因此,N1 和 N4 两个负漂移可能主要是受海平面下降的影响,即在灯一段沉积初期和灯四段沉积末期,盆地海平面下降速率大于盆地沉降速率,产生了这两个代表层序转换面的负漂移点。N2 负漂移点出现在灯二段内部,是海平面低位振荡和高位振荡的分界点(图 8 中事件 s-

10)。通过本次研究可知,低位振荡期海水平均温度为 10.8℃,平均 Z 值达 131.62;而高位振荡期海水平均温度为 23.2℃,平均 Z 值降至 127.54。因此,笔者认为,灯二段沉积中期环境的急剧变化造成海洋生物的灭亡,生物产率降低,进而造成碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 呈现负漂移。同时,由于灯二段发育有大套的藻云岩,而藻类生物的大量发育代表了灯二段沉积期海洋生物比较活跃,生物产量高,因此,灯二段内部以 N2 为分界点,分别出现了 P1、P2 两次正向漂移。N3 负漂移点出现在灯三段底部,在钻井岩心(高科 1 井)上,灯二段顶部发现有干旱气候背景下暴露产生的渗流豆,地震剖面上,灯二段与灯三段为角度不整合接触,因此,该负漂移主要与海平面的相对下降有关;另外,在威 117、和先锋剖面灯三段碎屑岩中都发现了大量的指示火山活动的锆石,火山活动造成生物产率急剧降低也是造成出现 N3 负漂移点的原因^[33]。

5.2 灯影组沉积充填特征

地质演化过程中,古海洋环境对于盆地沉积充填特征、高有机质丰度烃源岩的发育至关重要^[34]。一般认为, $\delta^{13}\text{C}$ 值的升高及 $\delta^{18}\text{O}$ 值下降可能反映全球温度升高、海平面(海水氧化还原界面)上升、海水盐度降低,生物产率增高,有机质产率增加,保存作用增强^[35]。笔者将通过碳氧同位素分析,结合构造背景,阐述古环境与沉积充填特征之间的关系。

通过碳氧同位素推断古环境特征可知,灯一段沉积期,古海水温度稍高(20.54℃),盐度中等(Z 值为 125.34),该时期海平面的缓慢上升,使得四川盆地在灯影初期为一个陆表海沉积,同时,该时期盆地坡度较缓,水体相差不大,整体沉积一套泥晶白云岩,局部见到藻云岩和灰黑色富有机质的泥晶白云岩。

灯二段沉积期古海洋具有具有低温度,高 Z 值,持续振荡的特点。笔者认为,海水的振荡波动为生物的繁盛提供了充足的养料,使得灯二段地层厚度大,并广泛发育有富藻段、藻云岩、葡萄状、雪花状藻白云岩和藻叠层石。由于低位振荡海退期与高位振荡海退期海洋环境的不同,灯二段岩性在垂向下存在差异,其中,灯二段下部主要为普通的藻云岩、雪花状藻白云岩,灯二段中上部发育葡萄状藻云岩。灯二段高位振荡期海水温度为 23.2℃,结合 Epstein 提出的海水盐度与 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的线性方程 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB}) = -21.2 + 0.61 \times \text{S 盐度}(\text{‰})$ 进行计算^[36],获葡

萄状藻云岩沉积时平均海水盐度为 24.92‰,这一结果与 Robin G C.(1977) 通过分析现代巴哈马滩葡萄石生存的海水环境^[37]是一致的(大巴哈马滩开阔海表面水的月平均温度为 22~31℃,盐度不超过 38‰)。

灯三段沉积时期,海平面短暂上升,古海洋温度增高,Z 值降低,沉积环境相对开阔。通过钻井和岩心分析,认为灯三段主要发育一套高伽马值的薄层状黑色、灰色的碎屑岩为主,少量颗粒白云岩。但受构造演化及火山活动的影响,灯三段白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈现负漂移。

灯四段沉积期,受气候和构造运动的双重影响,海水 Z 值升高,海平面持续下降,主要表现为一海退过程。灯四段下部为一套中厚层状泥粉晶云岩(图 2),到了海平面振荡下降期,又有大套的藻云岩和叠层石出现。

6 结 论

四川盆地灯影组 3 个采样点 69 组碳氧同位素样品 Mn/Sr<10, $\delta^{18}\text{O} > -10\text{‰}$,且碳氧同位素的相关系数均小于 0.1,样品具有较高的有效性,能够反映古海洋的原始信息。

(1)四川盆地震旦系白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在 -2.85‰~4.44‰,平均值为 1.8‰,绝大部分值落在 0‰~4‰ 的范围内; $\delta^{18}\text{O}$ 值分布在 -9.02‰~-1.90‰,平均值为 -5.42‰,数据主要处于 -8‰~-4‰ 之间。整体变化趋势与中国扬子地台同期地层的碳氧同位素特征基本相同。

(2)海相碳酸盐岩的 C、O 演化规律研究提供了古代沉积环境的重要信息,能有效地反映古海洋环境。分析认为,震旦纪灯影期四川盆地整体处于海相环境;海水温度主要介于 15~30℃ 之间,属温暖或炎热的亚热带气候;通过 $\delta^{18}\text{O}$ 值精确分析古海平面变化,认为灯影期,海平面经历了缓慢海进、低位振荡海退、高位振荡海退、短暂海进、持续海退、振荡海退六个阶段。

(3)碳酸盐岩中碳氧同位素组成的波动,有助于我们推断地质作用过程及盆地沉积特征。受到海平面升降、气候变化、构造运动以及火山活动等众多因素的影响,灯影组白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值除顶底两个负漂移外,内部地层还发现两次负漂移(N2 和 N3)和两次正向漂移(P1 和 P2);在古海洋环境的控制下,四

川盆地沉积了特征明显的灯二段葡萄状藻云岩、灯三段暗色碎屑岩以及灯四段富藻云岩。

参考文献 (References):

- [1] Vizer J, Hoefs J. The nature of $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ secular trends in sedimentary carbonate rocks[J]. *Geochim. Cosmo chim. Acta*, 1976, 40: 1387-1395.
- [2] 张秀莲. 碳酸盐岩中氧-碳稳定同位素与古盐度、古水温的关系[J]. *沉积学报*, 1985, 3(4): 17-30.
Zhang Xiulian. Relationship between carbon and oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1985, 71(1):45-53 (in Chinese with English abstract).
- [3] 吴珍汉, 吴中海, 胡道功, 等. 青藏高原北部中新统五道梁群湖相沉积碳氧同位素变化及古气候旋回[J]. *中国地质*, 2009, 36(4): 966-975.
Wu Zhenhan, Wu Zhonghai, Hu Daogong, et al. Carbon and oxygen isotope changes and palaeoclimate cycles recorded by lacustrine deposits of Miocene Wudaoliang Group in northern Tibetan Plateau [J]. *Geology in China*, 2009, 36 (4):966-975 (in Chinese with English abstract).
- [4] 罗顺社, 王凯明. 元素地球化学特征在识别碳酸盐岩层序界面中的应用——以冀北拗陷中元古界高于庄组为例[J]. *中国地质*, 2010, 37(2):430-437.
Luo Shunshu, Wang Kaiming. The application of element geochemical characteristics to the recognition of carbonate sedimentary sequence boundary: A case study of the Mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation in northern Hebei depression[J]. *Geology in China*, 2010, 37(2):430-437 (in Chinese with English abstract).
- [5] 王传尚, 李旭兵, 白云山, 等. 湖南永顺地区寒武系 SPICE 事件及其地层对比意义[J]. *中国地质*, 2011, 38(6):1440-1445.
Wang Chuanshang, Li Xubing, Bai Yunshan, et al. The Cambrian SPICE event in Yongshun area, Hunan Province, and its significance for stratigraphic correlation[J]. *Geology in China*, 2011, 38(6):1440-1445 (in Chinese with English abstract).
- [6] 王伟, 松本良, 王海峰, 等. 长江三峡地区上震旦统稳定同位素异常及地层意义[J]. *微体古生物学报*, 2002, 19(4):382-388.
Wang Wei, Matsumoto Ryo, Wang Haifeng, et al. The sulfur and carbon isotopic records in carbonates of the Dengying Formation in the Yangtze Platform, China [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2002, 19(4):382-388 (in Chinese with English abstract).
- [7] 张同钢, 储雪蕾, 张启锐, 等. 扬子地台灯影组碳酸盐岩中的硫和碳同位素记录[J]. *岩石学报*, 2004, 20(3):717-724.
Zhang Tonggang, Chu Xuelei, Zhang Qirui, et al. The sulfur and carbon isotopic records in carbonates of the Dengying Formation in the Yangtze Platform, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20 (6):717-724 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王东, 王国芝, 陈园园. 南江地区灯影组白云岩稳定同位素特征及意义[J]. *矿物学报*, 2011, S1:217-218.
Wang Dong, Wang Guozhi, Chen Yuanyuan. Characteristics and significance of carbon and oxygen isotopes of the dolomite in Dengying Formation, Nanjiang area [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2011, S1:217-218 (in Chinese).
- [9] 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等. 四川盆地构造与演化背景[M]. 北京:地质出版社, 1996:163-175.
Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui, et al. The Structure and Evolution of the Sichuan Basin [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1996:163-175 (in Chinese).
- [10] 宋文海. 对四川盆地加里东期古隆起的新认识[J]. *天然气工业*, 1987, 27(3):6-11.
Song Wenhai. Some new knowledge of Caledonia paleo-uplift in Sichuan basin [J]. *Natural Gas Industry*, 1987, 27 (3):6-11 (in Chinese with English abstract).
- [11] 宋文海. 乐山—龙女寺古隆起大中型气田成藏条件研究[J]. *天然气工业*, 1996, 16 (S1):13-26.
Song Wenhai. Research on reservoir-formed conditions of large-medium gas fields of Leshan-Longnvs Palaeohigh [J]. *Natural Gas Industry*, 16(S1):13-26 (in Chinese with English abstract).
- [12] 樊茹, 邓胜徽, 张学磊. 碳酸盐岩碳同位素地层学研究中数据的有效性[J]. *地层学杂志*, 2010, 34(4):445-451.
Fan Ru, Deng Shenghui, Zhang Xuelei. The data validity evaluation of carbonate $\delta^{13}\text{C}$ in C-isotope chemo stratigraphy[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2010, 34 (4):445-451 (in Chinese with English abstract).
- [13] 雷怀彦, 朱莲芳. 四川盆地震旦系白云岩成因研究[J]. *沉积学报*, 1992, 10(2):69-78.
Lei Huaiyan, Zhu Lianfang. Study of origin of the Sinian algal and nonalgal dolomities in Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica*, 1992, 10(2):69-78 (in Chinese with English abstract).
- [14] 王士峰, 向芳. 资阳地区震旦系灯影组白云岩成因研究[J]. *岩相古地理*, 1999, 19(3):21-29.
Wang Shifeng, Xiang Fang. The origin of the dolostones from the Sinian Dengying Formation in the Ziyang district, Sichuan [J]. *Sedimentary Facies and Paleogeography*, 1999, 19 (3):21-29 (in Chinese with English abstract).
- [15] 刘树根, 黄文明, 张长俊, 等. 四川盆地白云岩成因的研究现状及存在问题[J]. *岩性油气藏*, 2008, 20(2):6-15.
Liu Shugen, Huang Wenming, Zhang Changjun, et al. Research status of dolomite genesis and its problems in Sichuan Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2008, 20(2):6-15 (in Chinese with English abstract).
- [16] Kaufman A J, Jacobsen S B, Knoll A H. The Vendian record of Sr and C isotopic variations in seawater: Implications for tectonics and paleoclimate[J]. *Earth Planet Sci. Lett. Acta*, 1993, 120(3/4):409-430.
- [17] Li D, Ling H F, Pan J Y, et al. New carbon isotope stratigraphy of the Ediacaran-Cambrian boundary interval from SW China: implications for global correlation [J]. *Geological Magazine*, 2009, 146(4):465-484.
- [18] 陈强, 张慧元, 李文厚, 等. 鄂尔多斯奥陶系碳酸盐岩碳氧同位

- 素特征及其意义[J]. 古地理学报, 2012, 14(1):117-124.
- Chen Qiang, Zhang Huiyuan, Li Wenhui, et al. Characteristics of carbon and oxygen isotopes of the Ordovician carbonate rocks in Ordos and their implication [J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(1):117-124 (in Chinese with English abstract).
- [19] Lambert I B, Water M R, Wenlong Z, et al. Palaeoenvironment and carbon isotope stratigraphy of the upper Proterozoic carbonates of the Yangtze Platform [J]. Earth Planet Sci. Lett. Nature, 1987, 325(6100):140-142.
- [20] 王宗哲, 畅杰东, 孙卫国. 扬子地台震旦纪海水碳同位素的变化[J]. 高校地质学报, 1996, 2(1):112-120.
- Wang Zongzhe, Chang Jiedong, Sun Weigu. The changes of the Sinian seawater carbon isotopes in the Yangtze Platform [J]. Geological Journal of China Universities, 1996, 2 (1):112-120 (in Chinese with English abstract).
- [21] 彭花明, 朱志军, 姜勇彪, 等. 浙江江山灯影组碳、氧同位素特征[J]. 岩石矿物学杂志, 2006, 25(6):499-504.
- Peng Huaming, Zhu Zhijun, Jiang Yongbiao, et al. Carbon and oxygen isotope characteristics of Dengying Formation in Jiangshan, Zhejiang Province [J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2006, 25 (6):499-504 (in Chinese with English abstract).
- [22] 刘鸿允, 董榕生, 李建林, 等. 论震旦系划分与对比问题[J]. 地质科学, 1980, 4:307-321.
- Liu Hongyun, Dong Rongsheng, Li Jianlin, et al. Problems of classification and correlation of the Sinian system[J]. Chinese Journal of Geology, 1980, 4:307-321(in Chinese with English abstract).
- [23] 黄志诚, 陈智娜, 杨守业, 等. 中国南方灯影期海洋碳酸盐岩原始 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 组成及海水温度 [J]. 古地理学报, 1999, 1 (3):1-7.
- Huang Zhicheng, Chen Zhina, Yang Shouye, et al. Primary $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values in marine carbonates and the water temperature of Dengyingxia age in south China [J]. Journal of Palaeogeography, 1999, 1 (3):1-7(in Chinese with English abstract).
- [24] Dickson J A D. Carbonate Mineralogy and Chemistry[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1990:284-313.
- [25] 邵龙义. 碳酸盐岩氧-碳同位素与古温度等的关系[J]. 中国矿业大学学报, 1994, 23(1):39-45.
- Shao Longyi. The radiation of the oxygen and carbon isotope in the carbonate rocks to the paleotemperature etc. [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1994, 23 (1):39-45(in Chinese with English abstract).
- [26] Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia [J]. Precambrian Research, 2008, 160 (1-2):179-210.
- [27] 赵彦彦, 郑永飞. 全球新元古代冰期的记录和时限[J]. 岩石学报, 2011, 27(2):545-565.
- Zhao Yanyan, Zheng Yongfei. Record and time of Neoproterozoic glaciations on Earth [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(2):545-565 (in Chinese with English abstract).
- [28] Keith M L, Weber J N. Isotopic composition and environmental classification of selected limestones and fossils [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1964, 28:1786-1816.
- [29] 钱建兴. 南海 8KL 岩芯的氧同位素记录与海平面变化 [J]. 地质学报, 1994, 68(4):368-378.
- Qian Jianxing. Oxygen isotope record of core 8KL of the south China sea and sea-level change[J]. Acta Geologica Sinica, 1994, 68 (4):368-378(in Chinese with English abstract).
- [30] 桑树勋, 郑永飞, 张华, 等. 徐州地区下古生界碳酸盐岩的碳、氧同位素研究[J]. 岩石学报, 2004, 20(3):707-716.
- Sang Shuxun, Zheng Yongfei, Zhang Hua, et al. Research on carbon and oxygen stable isotopes of lower Paleozoic carbonates in Xuzhou area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20 (3):707-716 (in Chinese with English abstract).
- [31] 夏日元, 邹胜章, 梁彬, 等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩缝洞系统模式及成因研究[M]. 北京:地质出版社, 2011:101-107.
- Xia Riyuan, Zou Shengzhang, Liang Bin, et al. The Study on the Carbonate Fracture -Cavity System Pattern and Genesis of Ordovician in Tarim Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 101-107 (in Chinese).
- [32] 陈锦石. 地层学和稳定同位素[J]. 矿物学报, 1985, 9(2):142-148.
- Chen Jinshi. The stratigraphy and stable isotope geochemistry [J]. Journal of Stratigraphy, 1985, 9 (2):142-148(in Chinese).
- [33] 彭冰霞, 王岳军, 范蔚茗, 等. 贵州乐康剖面茅口阶—吴家坪阶碳同位素组成变化及峨眉山大火成岩省的响应 [J]. 地球化学, 2006, 35(2):126-132.
- Peng Bingxia, Wang Yuejun, Fan Weiming, et al. Carbon isotope composition changes of Maokouian -Wuchiapingian and the environmental effect of Emeishan large igneous province at Lekang section, Guizhou Province [J]. Geochimica, 2006, 35 (2):126-32 (in Chinese with English abstract).
- [34] 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 高演化海相碳酸盐烃源岩地球化学综合判识——以鄂尔多斯盆地为例[J]. 中国科学(D 辑), 2006, 26(3):167-176.
- Teng Ge'er, Liu Wenhui, Xu Yongchang, et al. Synthetic geochemical identification of high mature facies carbonate source rock: A case from Ordos basin[J]. Science in China(Series D), 2006, 26 (3):167-176 (in Chinese).
- [35] 王大锐, 白玉雷, 贾承造. 塔里木中-上奥陶统碳同位素组成正向偏移的石油地质学意义[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(4):15-16.
- Wang Darui, Bai Yulei, Jia Chengzao. The petroleum geological significance of carbon isotopic positive anomaly of the Middle - Upper Ordovician in Tarim basin, Northwest China [J]. Geochimica, 1998, 25 (4):15-16(in Chinese with English abstract).
- [36] Epstein S, Mayeda T K. Variations of the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratio in natural waters[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1953, 4:213.
- [37] (英) Robin G C 著. 碳酸盐沉积物及其成岩作用[M]. 中国科学院地质研究所译. 北京:科学出版社, 1977:77-78.
- Robin G C. Carbonate Sediments and Their Diagenesis [M]. Translated by the Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press, 1977:77-78(in Chinese).

Reconstruction of the late Sinian paleo-ocean environment in Sichuan basin and its geological significance

LUO Bei-wei¹, WEI Guo-qi², YANG Wei², DONG Cai-yuan¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China; 2. Langfang Branch of Petroleum Exploration and Development Research Institute, Langfang 065007, Hebei, China)

Abstract: On the basis of carbon and oxygen isotopic compositions of 69 dolomite samples collected from three sampling points of the Sinian Dengying Formation in Sichuan basin and the effectiveness evaluation of the data, the authors studied the changing characteristics of carbon and oxygen isotopes with the purpose of further reconstructing the corresponding paleo-ocean environment and investigating its geological meaning. The $\delta^{13}\text{C}$ values of dolomite in Dengying Formation vary from -2.85‰ to 4.44‰ with a mean value of 1.80‰ and the $\delta^{13}\text{C}$ varies vary between -9.02‰ and -1.90‰ , -5.42‰ on average. The changing trends of the carbon and oxygen isotopes are similar to those in other strata of the same period in the Yangtze platform. Through the reconstruction of paleo-ocean environment, the authors found that the Sichuan basin of Late Sinian Dengying period was in a marine environment, and the seawater temperatures varied mainly between 15°C and 30°C , suggesting a warm or hot subtropical climate. The sea level experienced six stages in Dengying period in the study area, i.e., slow transgression, lowstand oscillatory regression, highstand oscillatory regression, transient transgression, sustained regression and oscillatory regression. Under the influence of sea level fluctuation, climate change, tectonic movement and volcanic activity, four negative $\delta^{13}\text{C}$ anomalies (N1~N4) and two positive $\delta^{13}\text{C}$ anomalies (P1~P2) occurred in dolomite of Dengying Formation. The basin was filled with easily-recognized grape-sized algal dolomite in Deng2 Member, dark clastic rock in Deng3 Member and algal dolomite in Deng4 Member because of the influence of the paleo-ocean environment.

Key words: carbon and oxygen isotopes; paleo-ocean environment; geological significance; Dengying Formation; Late Sinian; Sichuan basin

About the first author: LUO Bei-wei, male, born in 1986, doctor candidate, engages in the study of tectonic geology; E-mail: luobw-1216@163.com.