

川东北地区长兴组-飞仙关组碳酸盐岩同位素地球化学响应及其地质意义

董庆民^{1,2}, 胡忠贵³, 陈世悦^{1,2}, 李世临⁴, 蔡家兰⁴, 朱宜新⁴, 张玉颖⁵

[1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石油大学(华东)深层油气重点实验室, 山东 青岛 266580; 3. 长江大学沉积盆地研究中心, 湖北 武汉 430100; 4. 中国石油西南油气田公司重庆气矿, 重庆 402160; 5. 森诺科技有限公司, 山东 东营 257000]

摘要:碳、氧同位素是碳酸盐岩研究的重要地化指标之一,在反映全球气候变化、海平面升降变化、成岩作用影响及进行地层对比等方面发挥着重要作用。基于川东北地区野外剖面考察、岩石薄片鉴定和微量元素分析,结合长兴组-飞仙关组241件碳酸盐岩样品的碳、氧同位素组成,建立同位素演化曲线,重点对碳、氧同位素地球化学响应特征进行区域性对比分析,进一步对其地质意义进行试验性探讨。研究表明:川东北地区长兴组碳同位素演化曲线与海平面变化呈明显的正相关关系,并可与层序内部体系域进行良好对应,该时期氧同位素组成呈相对稳定趋势;在二叠系/三叠系界线附近碳、氧同位素值均发生强烈负漂移,达到最低值;进入飞仙关期后碳同位素值进入低幅波动的恢复阶段,在飞仙关内部达到极大值后降低,氧同位素组成在飞仙关期也较为稳定。碳、氧同位素值在二叠系/三叠系界线处发生强烈负漂移可能与甲烷释放及火山喷发事件有密切关系。

关键词:同位素地球化学特征;碳酸盐岩;长兴组;飞仙关组;川东北地区;四川盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Isotope geochemical responses and their geological significance of Changxing-Feixianguan Formation carbonates, northeastern Sichuan Basin

Dong Qingmin^{1,2}, Hu Zhonggui³, Chen Shiyue^{1,2}, Li Shilin⁴, Cai Jialan⁴, Zhu Yixin⁴, Zhang Yuying⁵

[1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;
2. Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;
3. Sedimentary Basin Research Center, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China;
4. Chongqing Gas Branch, Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Chongqing 402160, China;
5. Sino Technology Co., Ltd., Dongying, Shandong 257000, China]

Abstract: The carbon and oxygen isotopes are important geochemical indexes for the study of carbonate rocks and have been widely used in revealing global climate changes and sea level fluctuation as well as diagenesis and stratigraphic correlations. This study starts with outcrop observation, thin-section identification and trace element analysis, continues with establishing isotope evolution curves with emphasis on the regional comparative analysis of the geochemical response characteristics of carbon and oxygen isotopes based on analyses of carbon and oxygen isotope compositions of 241 carbonate samples from the Changxing-Feixianguan Formations in northeastern Sichuan Basin, and ends with a discussion on the geological significance of these characteristics. The results show that the carbon isotope evolution curves positively correlate with sea level changes in the Changxing period and correspond well with the system tracts in the sequence. The oxygen isotope composition shows a relatively stable trend during this period. Strong negative drift of carbon and oxygen isotope values occurs near the Permian/Triassic boundary while reaching their lowest values. After entering the Feixianguan period, the carbon isotope value keeps rising with a low-amplitude fluctuation until reaching

收稿日期:2020-05-27;修订日期:2021-10-12。

第一作者简介:董庆民(1993—),男,博士研究生,沉积学及层序地层学。E-mail:416648529@qq.com。

通讯作者简介:陈世悦(1963—),男,教授、博士生导师,沉积学及非常规油气地质学。E-mail:chenshiyue@vip.sina.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05006-007,2016ZX05007-002)。

the maximum value inside the fourth member of Feixianguan Formation. The oxygen isotope composition is stable during the Feixianguan period. It is also suggested that the strong negative drift of carbon and oxygen isotopes at the Permian/Triassic boundary may be closely related to methane release and volcanic eruption events.

Key words: isotope geochemical characteristic, carbonate rock, Changxing Formation, Feixianguan Formation, northeastern Sichuan Basin, Sichuan Basin

近年来,四川盆地油气勘探取得了重大突破,海相碳酸盐岩层系所含资源量在四川盆地常规油气资源总量中占据重要地位,占比达85%左右^[1-6]。对于川东北地区而言,自1995年至今先后发现了铁山坡、渡口河、盘龙洞等大中型礁滩鲕滩油气藏,尤其在环开江-梁平海槽周缘的台缘带发现了以普光、元坝等为代表的一系列大型台缘礁、滩相气藏^[7-8],显示了川东北地区具有良好的油气勘探前景,也掀起了相关学者对川东北地区礁滩油气藏研究的热潮。此外,研究表明,碳、氧等同位素地球化学方法在海平面演化对比与反映成岩环境过程中扮演着十分重要的角色,因此可以作为海平面升降变化、成岩环境及层序地层划分和对比的一种指示性标志^[9-11]。

通过对川东北地区地质背景资料及前人对碳酸盐岩同位素研究总结发现:①二叠系/三叠系(P/T)界线处生物灭绝事件是显生宙以来地球经历的5次大灭绝事件中对陆地和海洋影响最大的一次,在短时间内引起海洋体系及陆地体系范围中50%以上的物种灭绝,与此同时早三叠世陆续出现的生物体积变小及生物种属单一化、火山活动多发等多次波动事件,使得学者的关注重点集中在P/T界线处及早三叠世^[12-13],而在二叠纪同样出现了海平面大幅度的波动、大范围的冰川活动及较频繁的火山活动^[9],因此对长兴期研究也具有重要意义;②国内外对于P/T界线处生物集群灭绝事件的驱动机制存在较大争议,如外星撞击、甲烷气体释放、海洋缺氧、火山活动等^[14],但至今仍未达成一致的认知;③前人对于川东北地区生物礁滩特征、沉积环境及储层研究程度较高,研究已趋于精细和成熟^[9,15-16],虽在川东北地区碳、氧同位素特征等方面也开展过一些研究^[17],但在碳酸盐岩同位素地球化学特征的研究上大多是基于大范围且宏观尺度的研究,对局部重点区域的长兴组-飞仙关组碳酸盐岩同位素地球化学特征及其差异性对比研究相对薄弱。此外,研究发现海平面的升降变化是形成层序的重要因素,而层序地层对储层发育又具有明显的控制作用。以往对于海平面升降变化的分析,通常基于岩相等定性的方式进行判别,本文结合地化特征等定量的方式来进行海平面升降变化趋势的分析,这对于更准确识别层序、判别储层

发育规律及指导油气勘探具有重要的实际意义。综上所述,本文拟选择定性定量相结合的方式,以位于同一海槽侧缘带的盘龙洞剖面、羊鼓洞剖面、渡口剖面、云阳沙市剖面作为主要研究剖面,将重点研究区域的同位素演化曲线与全球其他地区碳、氧同位素演化曲线进行对比,探讨P/T界线上下地层碳酸盐岩同位素地球化学响应特征及地质意义。

1 区域地质概况

四川盆地东北部处于扬子板块北缘,与大巴山-米仓山造山带相邻。研究区主要位于四川盆地东北部城口-鄂西海槽西侧,在构造位置上隶属于川东高陡弧形褶皱带,西抵华蓥山,东达齐岳山,南起梁平,北至大巴山,相较于邻区构造面貌其构造活动相对活跃(图1)。川东北地区自震旦纪以来,研究区先后经历了加里东运动、燕山运动、喜马拉雅运动等多期构造运动^[18],根据构造运动方式的差异,可进一步划分为两个阶段,燕山运动以前主要表现为以升降作用为主导,此后主要表现为水平作用为主导,这使得区内海相沉积具多元化的显著特点,从而在研究区内不同时期地层中形成了以长兴组-飞仙关组礁滩相储层为代表的多种储层类型。

在综合电性特征、岩性标志层及沉积旋回演化的基础上,通常将川东北地区长兴组确定为三分。飞仙关组以邻水-达县-涪陵区为界限,从南至北因三分渐不明显,通常以飞一段-飞三段、飞四段划分。长兴早期以碳酸盐缓坡为主,大致对应于长一段底部,主要发育泥晶灰岩及燧石结核灰岩,向上渐变为碳酸盐台地环境,长一段中上部 and 长二段主要发育泥晶灰岩、生屑灰岩(图2a,b)及礁灰(云)岩(图2c-f);长三段以泥晶灰岩、生屑灰岩及白云岩为主。飞仙关期的沉积格局对晚二叠世古地理有明显的继承性又有进一步的发展,整体为一套碳酸盐台地沉积,飞仙关末期演变为局限潮坪-潟湖环境^[9]。飞一段-飞三段主要发育泥晶灰岩、泥质灰岩、颗粒灰(云)岩(图2g,h)及白云岩,飞四段主要以发育泥质灰岩、泥晶灰岩和白云岩(图2i)为主。

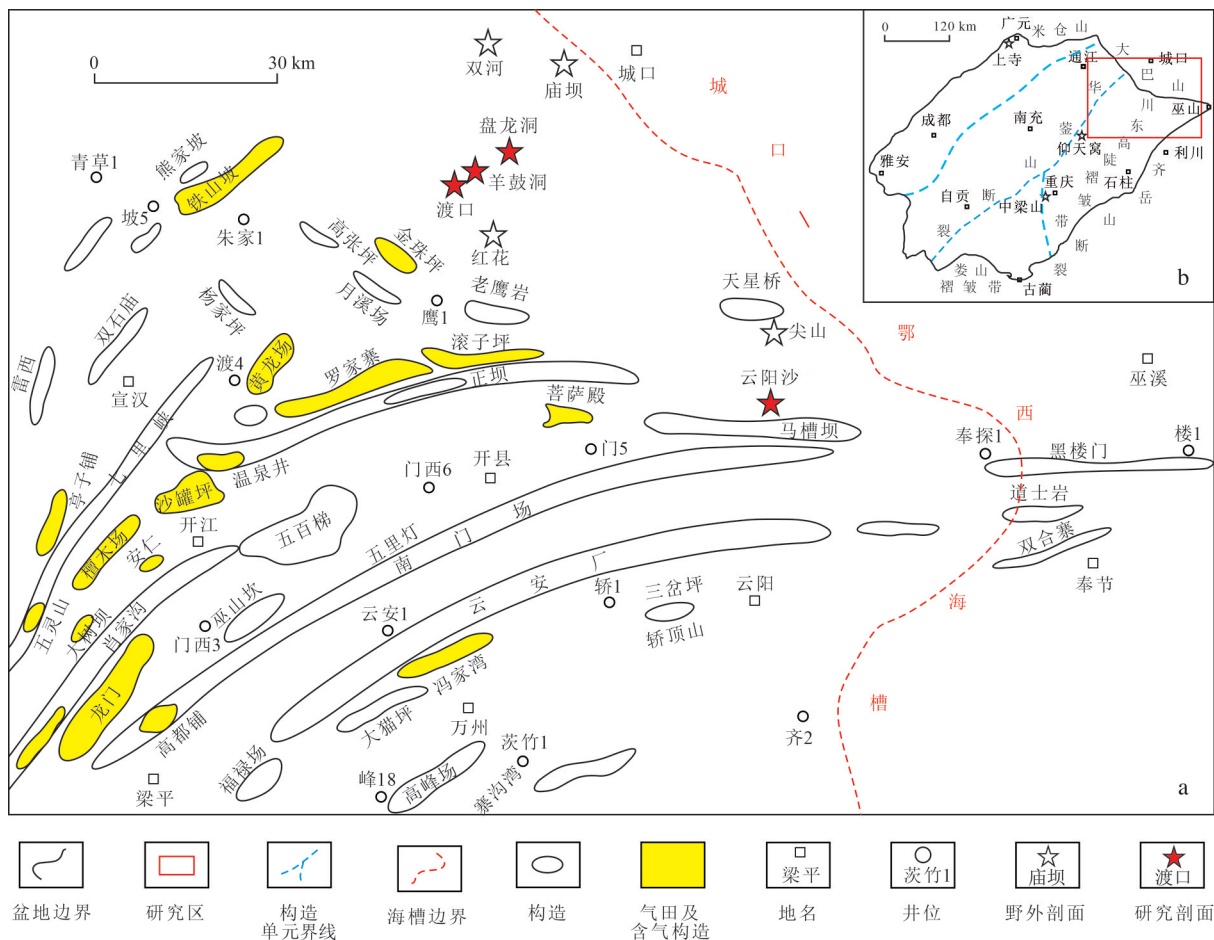


图1 川东北地区分布范围(a)及构造位置(b)

Fig. 1 Sketch map showing the distribution (a) and structural location (b) of northeastern Sichuan Basin

2 样品来源、测试分析及评价方法

2.1 样品来源及分布

四川盆地古生代—中三叠世海相碳酸盐岩地层较为发育且广泛出露,同时依据前人的研究数据表明盆地范围内的碳酸盐岩样品大多可以较好的代表古海水信息。本次研究选择城口-鄂西海槽边缘带盘龙洞剖面、羊鼓洞剖面、渡口剖面、云阳沙市剖面为主要研究剖面(图1),这些剖面虽处于同一台地区但地理位置及沉积相带却存在明显差异^[9],这为进行局部重点区域内同位素演化曲线的对比分析提供了坚实的基础。盘龙洞剖面主要涉及长兴组样品,因飞仙关组出露不完全导致采样工作终止于P/T界线处;羊鼓洞剖面、云阳沙市剖面及渡口剖面则完整采集长兴组-飞仙关组的样品,是3条完整的长兴期—飞仙关期海相碳酸盐岩沉积记录剖面。与此同时,它们具有交通方便、便于测量、便于取样、P/T界线容易识别以及有较好的前期

地层学工作基础等特点。

研究区内盘龙洞、羊鼓洞、渡口剖面均位于四川盆地东北部宣汉县境内,而云阳沙市剖面位于云阳县境内。本次研究采集原则为系统地由底到顶逐层采样,在每个小层采集一件样品,并在厚度较大的单个小层中增加样品采集数量,比如在盘龙洞剖面第8小层海绵骨架礁云岩中共采集了7件样品。基于此原则,盘龙洞剖面采集51件样品,羊鼓洞剖面采集60件,渡口剖面采集71件,云阳沙市剖面采集59件。

2.2 样品处理与测试分析

研究区长兴组-飞仙关组研究剖面在采样过程中需采集具新鲜面样品,并避开发育溶孔、溶洞、方解石脉及构造断裂带等位置,即从宏观尺度保证样品的有效性。在样品处理方面,要先将野外样品的风化面去除,选择其内部的小块样品,将所选取小块样品在玛瑙研钵内研磨至200目以上,以保证样品与固体磷酸充分反应。与此同时,在样品处理流程中要防止地质锤、玛瑙研钵等工具的交叉污染,否则也会在一定程度上

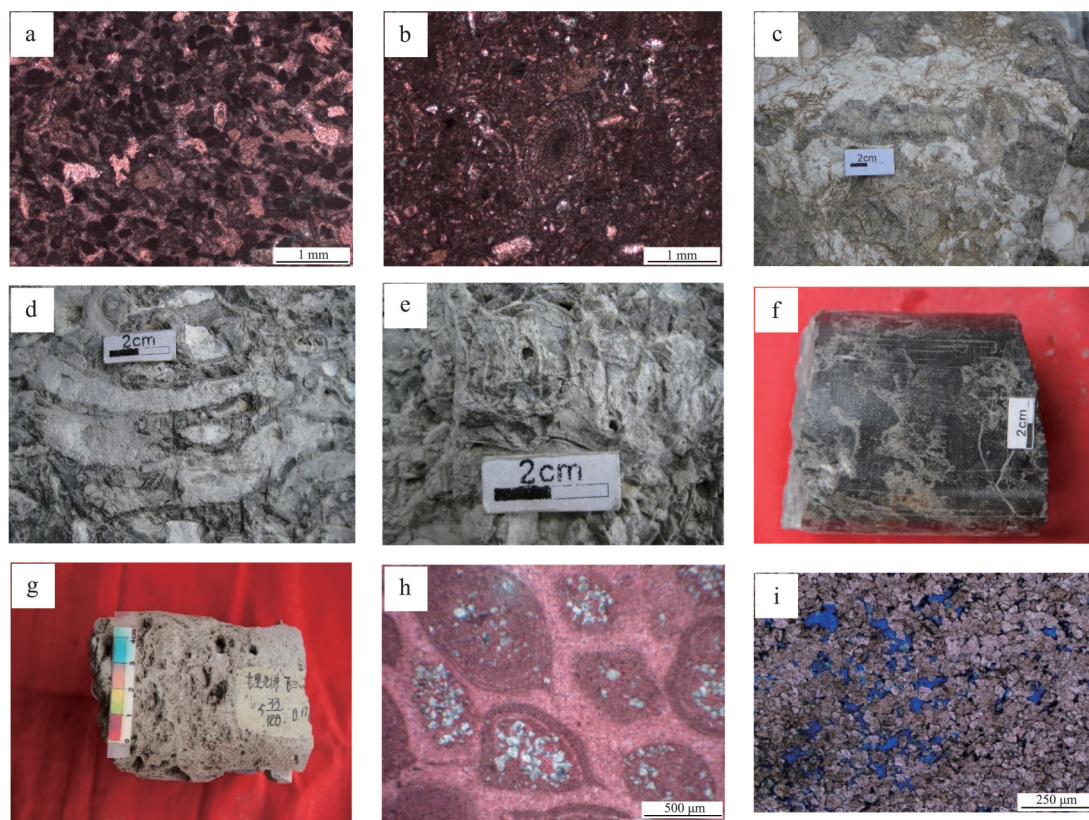


图2 川东北地区长兴组-飞仙关组主要岩石类型

Fig. 2 Main rock types in the Changxing-Feixianguan Formations, northeastern Sichuan Basin

a. 泥晶含生屑砂屑灰岩,砂屑较为发育,羊鼓洞剖面,长兴组,普通染色薄片(-);b. 泥晶生屑灰岩,渡口剖面,生屑可见蜓类等,长兴组,普通染色薄片(-);c. 海绵骨架礁灰岩,骨架间被方解石充填,盘龙洞剖面,长兴组;d. 骨架礁云岩,造礁生物以水螅为主,盘龙洞剖面,长兴组;e. 海绵礁云岩,可见海绵体腔孔,盘龙洞剖面,长兴组;f. 海绵障积礁灰岩,造礁生物以海绵为主,温泉003-X2井,长兴组,埋深3 298.50 m,岩心照片;g. 含粒屑残余鲕粒白云岩,溶洞发育,七里北1井,飞仙关组,埋深5 830.06 m,岩心照片;h. 亮晶鲕粒云质灰岩,白云石主要交代鲕粒核心,云阳沙市剖面,飞仙关组,普通染色薄片(-);i. 细晶白云岩,白云石晶形完好,晶间孔较发育,新兴1井,飞仙关组,埋深3 277.18 m,铸体染色薄片(-)

对样品数据造成误差。

此外,在进行同位素测试分析之前,需在野外剖面观察的基础上,结合镜下薄片鉴定以明确样品的岩性特征,为样品的有效筛选提供基本的岩石学资料。依据岩石学资料,需借助微观尺度手段来保证样品数据的有效性,即进一步对微量元素进行测试,Mn和Sr含量测试在ICAP 7000等离子体质谱仪上进行,全岩碳、氧同位素测试分析在DELTA V Advantage气体同位素质谱仪上采用磷酸法进行,测试标样标准为IAEA-CO-8, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 测定值标准偏差分别小于0.032‰和0.2‰。

2.3 样品蚀变性评价方法

不同类型的海相碳酸盐岩对古海水信息保存性存在明显差异,原因在于碳酸盐岩在沉积演化中易遭受成岩蚀变^[9,19]。海相碳酸盐岩在成岩后生作用中会伴生微量元素的增多或减少,比如在成岩作用过程中会

出现Mn含量的增多及Sr含量的减少。由于生物大灭绝等原因使得古生物化石相对贫乏,且分布不均匀,因此建立一条以抗蚀变性较强的生物壳体为测试样品的高分辨率同位素曲线难乎其难。更何况目前学者对于同位素分析测试多采用全岩样品,因此,唯有准确识别碳酸盐岩的成岩蚀变作用才能更好地反映古海水信息。此外,Horacek等^[20]在研究阿尔卑斯山南部地层剖面时发现碳同位素在成岩环境中较稳定,不易遭受成岩作用干扰,但氧同位素在成岩环境中相较于碳同位素更加灵敏,成岩作用对其具有明显的影响,这更表明了研究碳、氧同位素时进行样品蚀变性评价的必要性。

目前对于碳酸盐岩蚀变性的评价方法主要有稳定同位素分析,Mn、Sr含量和Mn/Sr比值分析,扫描电镜分析,X衍射分析,阴极发光分析,以及氨基酸分析等。微量元素分析作为海相碳酸盐岩蚀变性评价方法中重要的一环,主要是依据在成岩过程中碳酸盐岩矿物中

的元素会与成岩流体中元素进行交换,碳酸盐岩会出现Sr和Na的丢失及Fe和Mn的获取^[21],若样品的成岩蚀变性较弱,则样品中会相应发生Sr元素含量较高及Mn元素含量较低的现象。Derry和Korte等^[22-23]在研究同位素地层学时,提出将Sr元素含量的下限值设为 200×10^{-6} 及Mn元素含量的上限值设为 250×10^{-6} ,以此作为蚀变性评价标准,但由于碳酸盐岩中元素的含量也容易遭受温度、压力等沉积环境的影响,因此Kaufman等^[24]在研究加拿大西北部地层剖面时建议通过Mn/Sr含量比值分析来进一步识别和判断样品蚀变性。目前大多数学者认为当Mn/Sr含量比值小于2~3时,样品才能较好地反映当时海水的组成。因此本次研究在微量元素方面将Mn/Sr含量比值标准设为2,若Mn/Sr含量比值小于2,则表明样品蚀变性较弱,能较好地反映古海水信息。

除上述评价方法外,碳、氧同位素组成在一定程度上也能为成岩蚀变性评价提供参考依据。若碳酸盐岩在成岩作用过程中遭受蚀变越强烈,碳、氧同位素组成的相关性就越强^[25]。从研究区内4条剖面的碳、氧同位素相关性分析图中可以看出(图3),羊鼓洞剖面的碳氧同位素组成相较于其他剖面相关性较明显。但鉴于采集样品数量较多,在分析碳、氧同位素相关性时也只能具体到单个剖面的整体相关性,具有一定程度的隐蔽性,因此有必要对单个样品进行蚀变性评价。此外,由于氧同位素组成在后期更易遭受成岩改变,因此氧同位素组成也可以作为判断蚀变性标准之一^[9,26],本次研究将氧同位素的蚀变性评价标准值设为-10‰,当氧同位素值 $\delta^{18}\text{O}$ 大于-10‰时,则说明能较好地反映古海水信息,反之则说明遭受成岩作用较强烈。目前在使用氧同位素组成这项评估方法时虽有更严格的标准,但由于羊鼓洞剖面氧同位素整体值偏负,所以氧同位素选取-10‰为评估界限。

此外,鉴于氨基酸分析、扫描电镜分析和X衍射分析等手段在碳酸盐岩成岩蚀变性评价中效果较差,同时碳、氧同位素相关性分析也具有一定的隐蔽性,因此,为保证研究区长兴组-飞仙关组海相碳酸盐岩的碳、氧同位素组成的准确性,本次研究笔者采取了将Mn/Sr含量比值法与稳定同位素含量法二者相结合的方法来对样品进行蚀变性评价。

3 测试结果及样品蚀变性评价

研究区长兴组-飞仙关组共采集碳酸盐岩样品241件,其中长兴组样品共132件,飞仙关组样品109

件。在样品处理与测试的基础上,将测试结果依据上述蚀变性标准进行蚀变性评价,盘龙洞剖面长兴组岩石类型虽以礁灰(云)岩、颗粒云岩为主,但仍显示出对古海水具有良好的代表性。若以Mn/Sr比值法来判断样品蚀变性,有5个样品不符合标准;若以 $\delta^{18}\text{O} > -10\text{‰}$ 的方法来判断,51个样品均符合标准;因此将两者综合分析共有5个样品需要剔除。羊鼓洞剖面若以Mn/Sr比值法来判断样品蚀变性,有9个样品不符合标准;若以 $\delta^{18}\text{O} > -10\text{‰}$ 的方法来判断,有7个样品不符合标准,将两者综合分析共有15个样品不符合标准,表明羊鼓洞剖面对古海水信息的代表性较一般,同时纵观羊鼓洞剖面飞仙关组的氧同位素组成,发现该剖面相较于渡口及云阳沙市剖面有较负的氧同位素组成,可能是羊鼓洞飞仙关组氧同位素本身就具备此特征。渡口剖面若以Mn/Sr比值法来判断样品蚀变性,有6个样品不符合标准;若以 $\delta^{18}\text{O} > -10\text{‰}$ 的方法来判断,71个样品均在标准之内;因此共有6个样品不符合标准,表明渡口剖面样品较好地保持了原始海水的同位素组成。云阳沙市剖面样品若以Mn/Sr比值法来判断样品蚀变性,有4个样品不符合标准;若以 $\delta^{18}\text{O} > -10\text{‰}$ 的方法来判断,样品均符合标准;因此共有4个样品不符合标准,表明受到较弱的成岩蚀变(表1)。

综上所述,4条剖面共采集样品241件,经过严格的蚀变性评价,27件样品因不符合标准而被剔除,总剔除率为11.2%,其中,12件来源于长兴组,15件来源于飞仙关组,其原因可能与飞仙关组发生不同程度的白云岩化有关,由此造成飞仙关组样品对古海水信息的保存程度稍差于长兴组。

4 碳、氧同位素组成及地质响应特征

4.1 碳同位素演化特征

依据样品蚀变性评价方法,采用在标准范围内、对古海水信息保存较好的样品数据来建立川东北地区长兴组-飞仙关组碳酸盐岩碳、氧同位素演化曲线。张继庆等^[27]学者对四川盆地内P/T分界线等有关研究成果作过归纳,在不考虑混生动物层时,一般都把岩性差异作为分界依据。本文即是在岩性界面基础上建立的长兴组-飞仙关组 $\delta^{13}\text{C}$ 演化曲线(图4—图6),并可与周缘及国内外地区使用生物分带建立的长兴组-飞仙关组碳同位素演化曲线进行对比研究。

川东北地区长兴组共采集120件样品, $\delta^{13}\text{C}$ 值介于0.152‰~5.529‰,平均值为2.941‰。研究剖面在

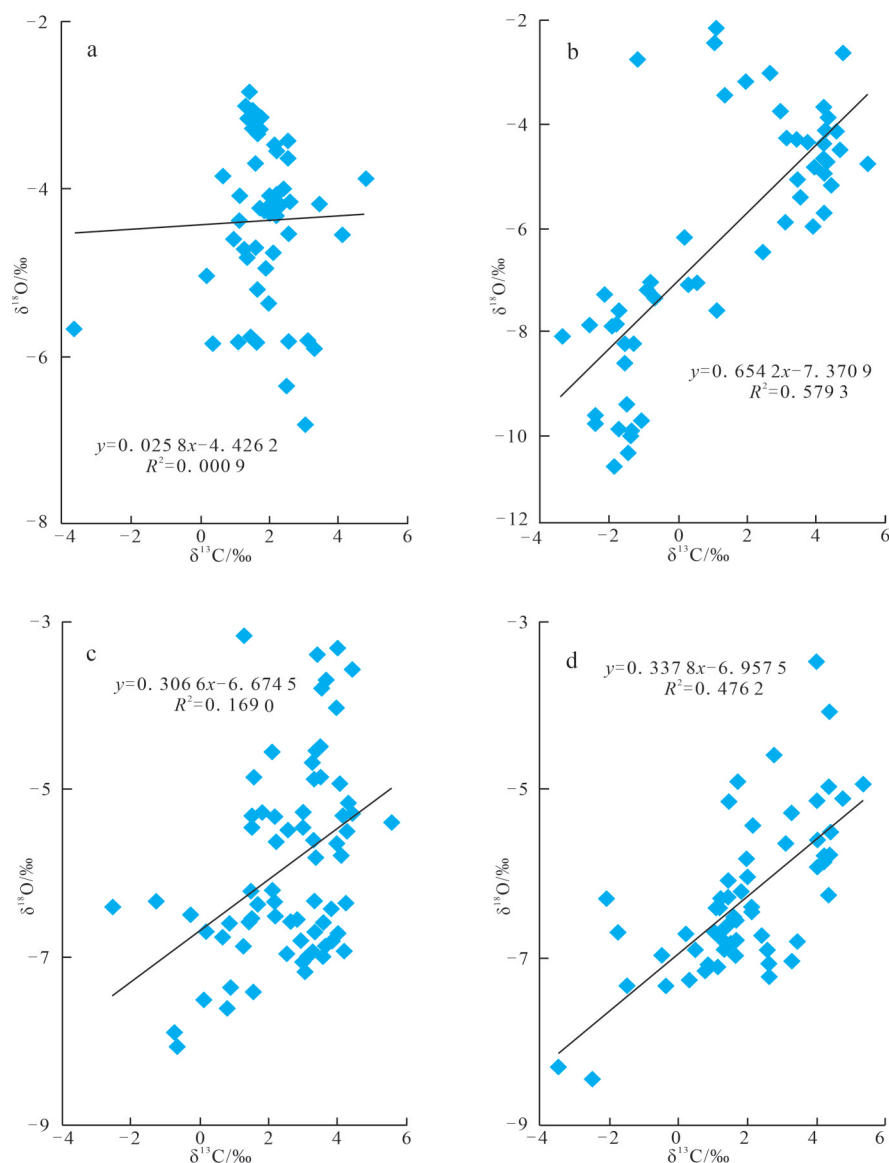


图3 川东北地区长兴组-飞仙关组碳、氧同位素值相关性分析

Fig. 3 The correlation analysis of carbon and oxygen isotope values in the Changxing-Feixianguan Formations, northeastern Sichuan Basin

a. 盘龙洞剖面; b. 羊鼓洞剖面; c. 渡口剖面; d. 云阳沙市剖面

长兴期 $\delta^{13}\text{C}$ 值最大幅度差为 4.654 ‰, 进一步分析发现, 研究区在长兴初期海平面大幅度上升, 从四级层序内部的体系域来看, 可与层序 sq1 中的海侵体系域相对应(图 5、图 6 中 A—B 段), 碳同位素值因海平面上升也相应呈增加的趋势, 上升幅度在 0.968 ‰ ~ 3.277 ‰, 在此时期 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在 2.191 ‰ ~ 5.468 ‰, 反映出碳同位素组成具有高值的特征, 此时研究区以发育泥晶灰岩相或硅质灰岩相等低能岩相为主。川东北地区从 sq2 时期至 sq3 时期转变为高位体系域, 海平面呈整体下降趋势, 碳同位素值也相应呈下降的趋势, 在此期间碳同位素值存在着小幅度的震荡(图 5、图 6 中 B—C 段), 这也间接证明了当时水体环境的动荡, 使得该时

期发育的岩相类型以高能沉积为主, 可见礁灰岩相、礁云岩相和颗粒灰岩相等。sq3 时期后海平面由下降变化为上升, 可与 sq4 中的海侵体系域相对应, 碳同位素值也相应增大(图 5、图 6 中 C—D 段), 岩相类型也相应以发育泥晶灰岩相等低能岩相类型为主, 盘龙洞剖面在该时期由于处于古地貌相对高地而发育颗粒灰岩相, 但灰泥含量较高。继长兴中晚期短暂海侵之后, 研究区转变为海退, 可与 sq4—sq5 中的高位体系域相对应, 碳同位素值整体也相应减小(图 5、图 6 中 D—E 段), 羊鼓洞剖面、盘龙洞剖面及云阳沙市剖面在该时期可见颗粒灰岩相、颗粒云岩相等高能岩相类型, 代表水体环境相对较浅, 适宜滩体发育。最终在海平面持

表1 川东北地区长兴组-飞仙关组碳酸盐岩样品蚀变性评价结果

Table 1 Alteration evaluation of carbonate rock samples from the Changxing-Feixianguan Formations, northeastern Sichuan Basin

研究剖面	层位	样品 总数/个	$\delta^{18}\text{O} < -10\text{‰}$		$\text{Mn}/\text{Sr} < 2$	
			剔除 样品 数/个	剔除 率/ %	剔除 样品 数/个	剔除 率/ %
盘龙洞	长兴组	51	0	0	5	9.80
渡口	长兴组	33	0	0	3	9.10
	飞仙关组	38	0	0	3	7.90
羊鼓洞	长兴组	30	0	0	3	10.00
	飞仙关组	30	7	23.30	6	20.00
云阳沙市	长兴组	18	0	0	1	5.60
	飞仙关组	41	0	0	3	7.30
长兴组剔除率/ %			4.98			
飞仙关组剔除率/ %			6.22			

续下降的背景下,研究区以泥-粉晶云岩相结束。整体而言,长兴期海平面整体上呈下降趋势^[9],碳同位素值呈明显减小的现象,表明碳同位素值与海平面升降变化呈较好的正相关特征。

进入P/T界线附近时,川东北地区渡口剖面样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值从长兴末期的2.232‰降低至P/T界线处的-2.547‰,差值达到4‰以上;羊鼓洞剖面样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值从长兴末期的3.021‰降低至P/T界线处的-3.356‰,差值达到6‰以上;云阳沙市剖面样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值从长兴末期的4.557‰降低至P/T界线处的-2.465‰,差值同样达到6‰以上(图6中E—F段)。区内建立的3条曲线再度证实了前人所总结出

的碳同位素负漂移的客观事实,如浙江煤山、大贵州滩等地区^[28-29](图7a),浙江煤山剖面样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值从3.7‰降低至P/T界线处的-2.4‰,大贵州滩地区样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值从长兴末期的约3.5‰迅速降低至P/T界线处的-1.0‰左右,差值同样达到4‰以上,表明负漂移事件为全球性的事件,这也为飞仙关期全球碳循环大幅度动荡拉开帷幕。

川东北地区飞仙关组共94个样品, $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在-3.356‰~4.228‰,平均值为1.125‰。继P/T界线附近碳同位素的迅速负漂移后,羊鼓洞剖面、渡口剖面及云阳沙市剖面飞仙关期海水的 $\delta^{13}\text{C}$ 值进入了一个低幅波动的恢复阶段(图6中F—H段),渡口剖面及云阳沙市剖面飞仙关期海水的 $\delta^{13}\text{C}$ 值接近恢复到了长兴期海水的碳同位素值,表明飞仙关期为生物大灭绝后的生态恢复期,有机碳埋藏量增加。但羊鼓洞剖面在飞仙关期碳同位素组成与前两个剖面存在较大的差异,具体表现为羊鼓洞剖面在此期间 $\delta^{13}\text{C}$ 值大部分为负数,飞仙关晚期才转为正值,此现象与下扬子南京湖山剖面、巢湖平顶山北坡剖面表现一致^[30-31](图7b),均在飞仙关中晚期时碳同位素值才逐渐恢复正值。 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加是生物复苏的反映, $\delta^{13}\text{C}$ 值增加缓慢的原因可能与P/T界线处生物大灭绝地质事件对该区生态环境的破坏极其严重、生物复苏缓慢有关,表明早三叠世碳同位素组成既有着大范围的共性,也具有着小区域的差异。其次,从所建立的飞仙关组海相碳酸盐岩的碳同位素组成特征来分析,其规律性较长兴期差,与四级层序内部的体系域无明显相关关系,因此与岩相发育类型也缺乏较好的响应特征。其原因可能与生物集群大灭绝后碳循环的动荡及生态环境的不稳定相关。但演化曲线总体上表现出明显的上升趋势,在飞四段内部达到极大值后降低(图6中G点)。

综上所述,长兴期碳同位素组成相对稳定,从P/



图4 川东北地区长兴组-飞仙关组关键岩性界面

Fig. 4 The key lithological boundary for the Changxing-Feixianguan Formations, northeastern Sichuan Basin

a. 云阳沙市剖面长兴组与飞仙关组分界面; b. 云阳沙市剖面飞仙关组与嘉陵江组分界面

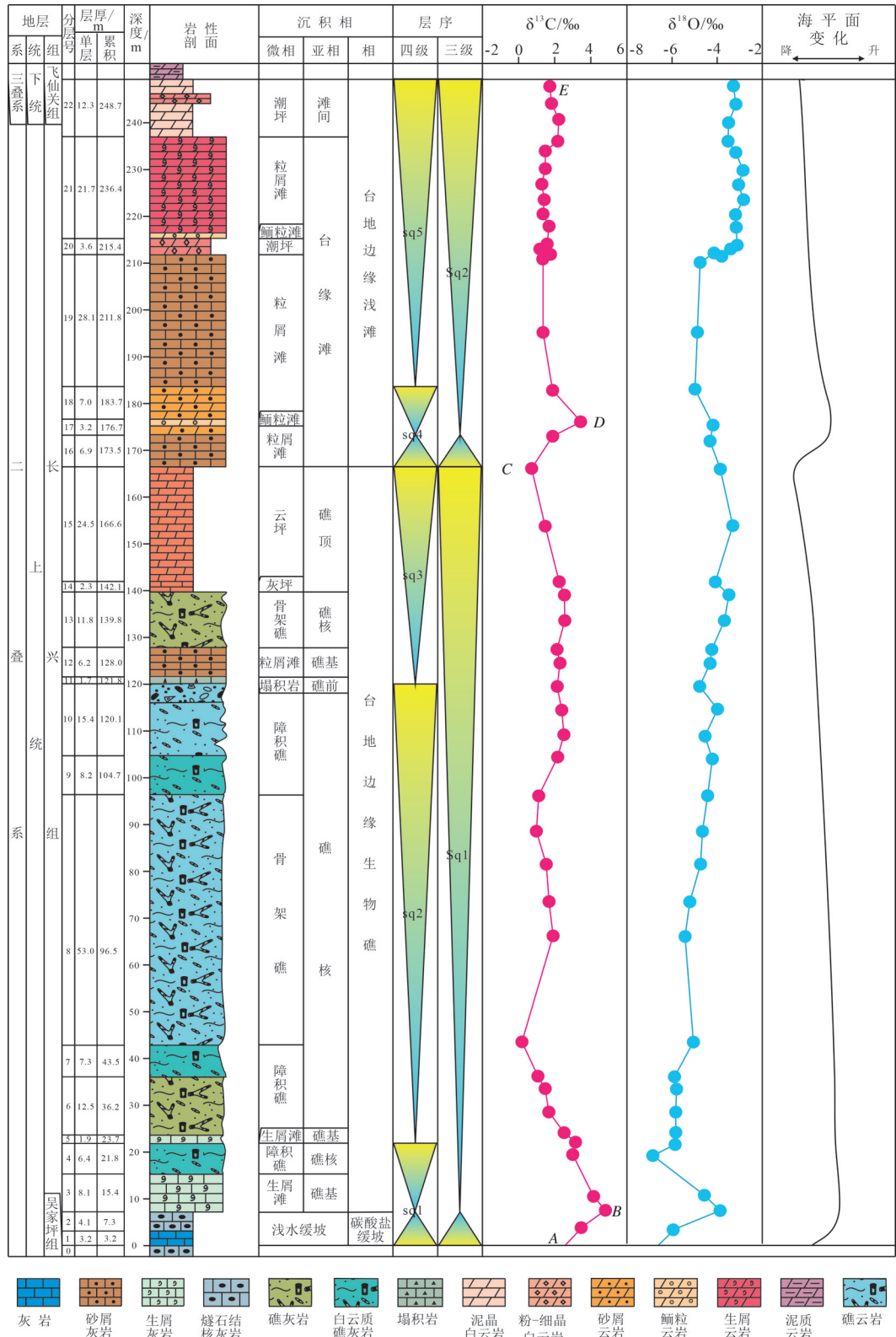


图5 川东北地区盘龙洞剖面长兴组碳、氧同位素曲线演化特征

Fig. 5 Evolution characteristics of carbon and oxygen isotope curves for the Changxing Formation, Panlongdong outcrop, northeastern Sichuan Basin

T界线附近至飞仙关期时,碳同位素组成转变为大幅度的动荡。从长兴期—飞仙关期整体碳同位素值

分析来看,碳同位素值呈下降趋势,反映海平面不断降低,表明研究区长兴组—飞仙关组碳同位素演化曲

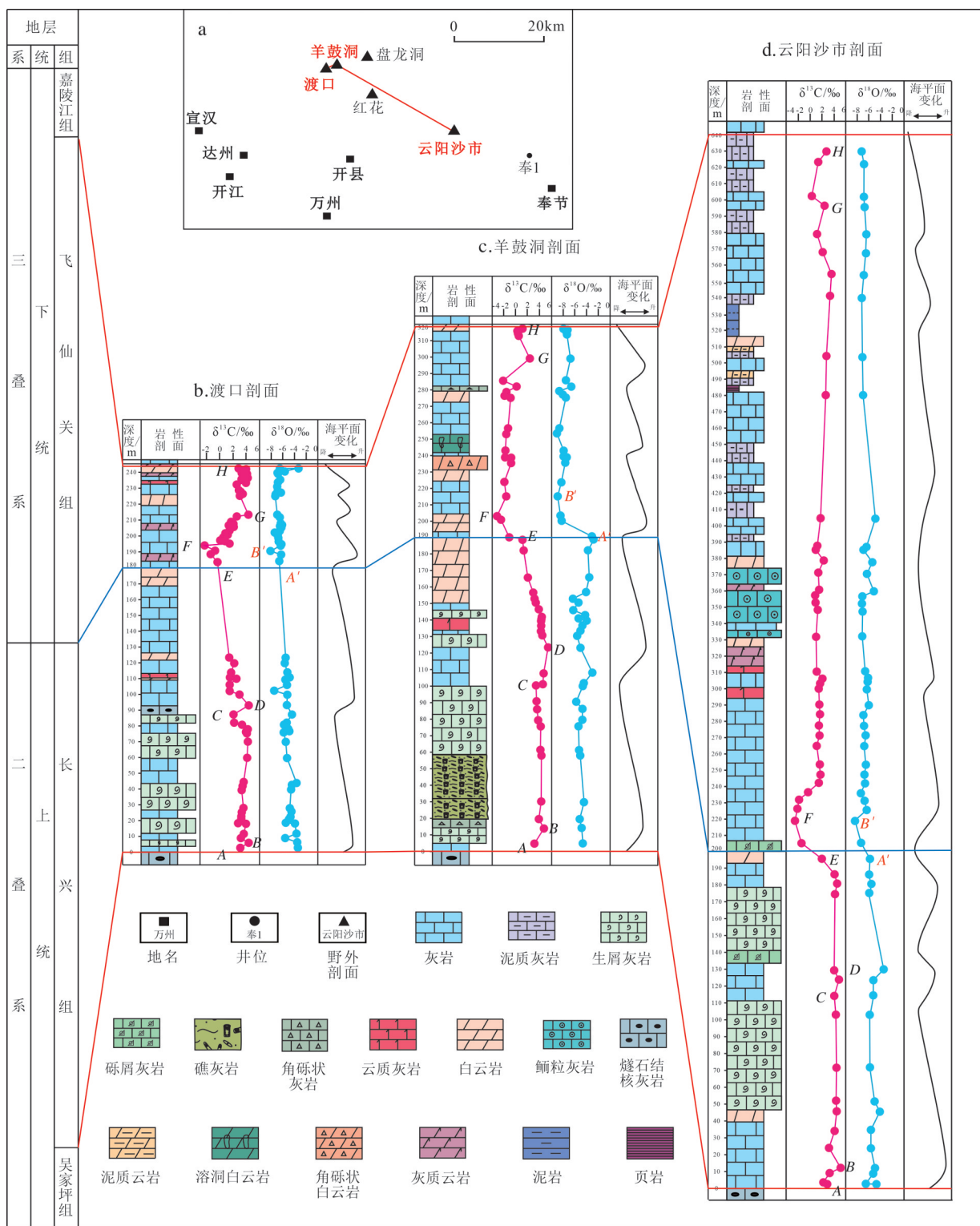


图6 川东北地区长兴组-飞仙关组剖面位置(a)和碳、氧同位素组成特征及海平面变化(b—d)

Fig. 6 Section location (a) and composition of carbon and oxygen isotopes and sea-level changes during the deposition of the Changxing-Feixianguan Formations (b—d), northeastern Sichuan Basin

线与海平面变化呈明显正相关关系(图6);此外,长兴期—飞仙关期碳同位素值范围均分布在 Veizer 等^[32]报道的同期海水的碳同位素分布区间范围内(图8a)。

4.2 氧同位素演化特征

目前,前人对全球地区 P/T 界线附近及早三叠世海水的碳同位素组成研究程度较高^[12,31],但对于长兴

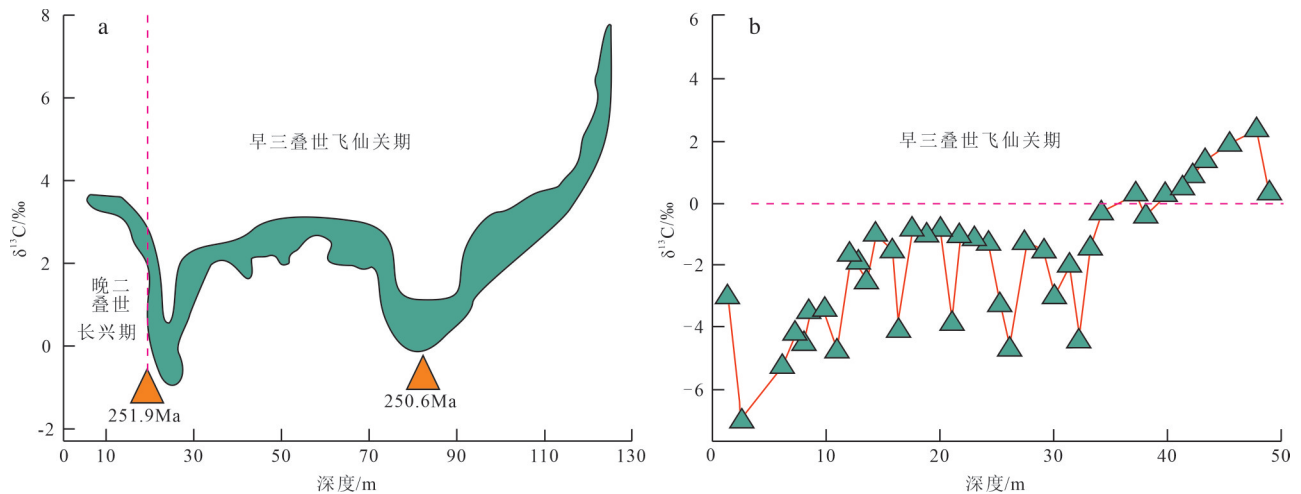


图7 贵州大贵州滩(a)和南京湖山剖面(b)早三叠世碳酸盐岩碳同位素演化曲线(据文献[29]和[31]修改)

Fig. 7 Carbon isotope evolution curves of marine carbonate rocks of the Early Triassic in the Great Guizhou Bank outcrop in Guizhou Province and the Hushan outcrop near Nanjing City (modified after references [29] and [31])

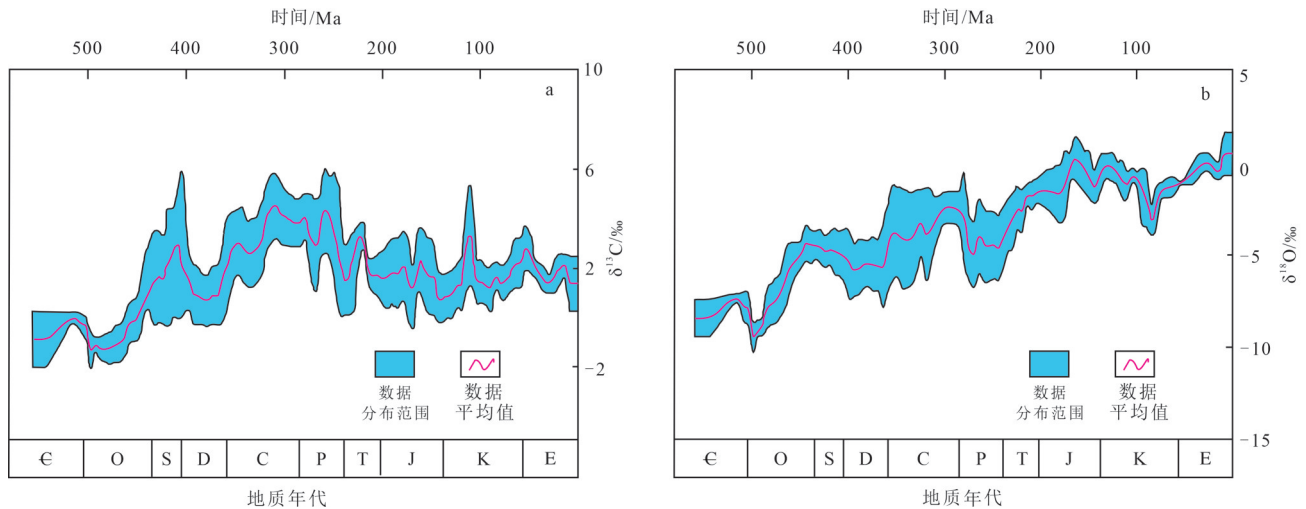


图8 显生宙低镁方解石生物壳 $\delta^{13}\text{C}$ (a)和 $\delta^{18}\text{O}$ (b)的演化趋势(据文献[32]修改)

Fig. 8 Phanerozoic $\delta^{13}\text{C}$ (a) and $\delta^{18}\text{O}$ (b) evolution trend for LMC (low magnesium calcite) shells (modified from reference [32])

期—飞仙关期海水的氧同位素组成的研究相对薄弱,这主要是由于氧同位素易和孔隙流体中的元素发生替代所导致的,此外氧同位素对温度变化较为灵敏,因此碳酸盐岩的氧同位素在成岩环境中具有不稳定性。虽然其所代表的氧同位素组成对川东北地区长兴期—飞仙关期仅具有有限的参考价值,但在氧同位素演化曲线演化趋势中意义较大。

从建立的长兴期碳酸盐岩的氧同位素曲线演化型式来看,研究区内4条剖面表现为小幅度的波动,盘龙洞剖面样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布在 $-3\text{‰} \sim -5\text{‰}$;羊鼓洞剖面及渡口剖面样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布在 $-4\text{‰} \sim -5\text{‰}$;云阳沙市剖面样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布在 $-5\text{‰} \sim -6\text{‰}$ (图6)。上述4条剖面在长兴期时 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围分布在Veizer等^[32]报道的同期海水的氧同位素分布区间范围内

(图8b)。

当进入P/T界线附近时,长兴末期海水的氧同位素组成与碳同位素组成类似,也发生了负漂移现象,在界线处氧同位素值降至最低。羊鼓洞剖面样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值从长兴末期的 -2.756‰ 降低至 -8.935‰ ;渡口剖面样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值从长兴末期的 -4.846‰ 降低至 -8.060‰ ;云阳沙市剖面样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值从长兴末期的 -3.457‰ 降低至 -8.440‰ 。3条剖面样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在P/T界线附近时都出现了类似碳同位素的负漂移现象(图6中A'—B'段),在过去的研究中大多将负漂移现象认为受成岩作用的影响,随着进一步的研究探索后,发现在巢湖平顶山北坡剖面及开江—梁平海槽西侧的中梁山/仰天窝剖面在P/T界线处 $\delta^{18}\text{O}$ 值均发生负漂移现象^[17,30],中梁山剖面/仰天窝剖面在界线附近

甚至降至-10‰。Sun等^[33]在研究南盆江盆地早三叠世磷酸盐氧同位素时也指出,在南盆江盆地P/T界线附近也发生类似的现象。虽然碳酸盐岩氧同位素与磷酸盐氧同位素不能直接对比,但从前述不同地区的P/T界线附近处氧同位素特征来看,也印证了负漂移现象是存在的。

随着P/T界线附近氧同位素负漂移事件的结束,飞仙关期海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值略有恢复,但幅度较小(图6)。羊鼓洞剖面样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值集中在-7‰~-8‰;渡口剖面样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值集中在-6‰~-7‰;云阳沙市剖面样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值集中在-6‰~-7‰。上述3条剖面在飞仙关期时 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围分布在Veizer等^[32]报道的同期海水的氧同位素分布区间范围内(图8b)。同时研究发现,羊鼓洞剖面相较于渡口及云阳沙市剖面样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值也具有明显不同的特征(图6),具有相对较低的氧同位素组成。

5 碳、氧同位素演化曲线的地质意义

5.1 碳同位素演化曲线

P/T界线附近碳同位素负漂移事件在全球很多剖面都有出现,如伊朗、加拿大、中国下扬子地区、挪威、澳大利亚等,相关学者进行研究后一致认为这是涉及到全球性地质事件^[34-35]。研究区内晚二叠世期海水的 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要集中在3‰~5‰,而在P/T界线处突变为-2‰~-3‰,差值达到4‰~7‰,负漂移现象在国内外地区也广泛存在。此外,生物种类也急剧减少,从长兴期古生物繁盛,地层常含蜓、有孔虫、海绵藻类等化石转变为早三叠世时期的古生物大量灭绝^[9]。

关于P/T界线附近的碳同位素负漂移驱动机制莫衷一是,如火山事件、海平面下降有机碳埋藏与氧化、甲烷释放等。碳同位素负漂移现象代表着有较多的轻碳从岩石圈到海洋-大气圈中运移,Kamo等^[36]认为西伯利亚地区火山活动是P/T界线附近的碳同位素负漂移的驱动机制之一,但Payne等^[37]研究计算后认为,即使是西伯利亚地区庞大的火山喷发碳总量也只能造成不足1‰的碳同位素负漂移,这显然与研究区及全球其他地区发生的负漂移现象存在较大差异,表明碳同位素负漂移现象不单纯是由西伯利亚地区火山活动控制的。

笔者认为P/T界线附近出现碳同位素负漂移现象的另外一个原因可能与甲烷释放有关。甲烷在海洋底部呈相对稳定状态,大量释放须在火山活动、行星

撞击等地质事件触发条件下发生,晚二叠世发生的地幔柱活动引起的火山喷发、构造抬升、断裂会造成甲烷的大量释放。另一方面晚二叠世末期发生的海平面下降既会造成有机碳氧化速率的增加,也会造成甲烷的释放。甲烷释放到海洋中与氧气发生反应产生大量的 CO_2 ,由于甲烷的碳同位素组成本身较负,大致分布在-40‰~-80‰^[38],相较于碳酸盐岩碳同位素组成相差较大。Buffett等^[39]研究后认为在P/T界线处发生4‰的碳同位素负漂移最多会消耗海洋底部甲烷总量的1/4左右,这是碳同位素负漂移依据的一个良好补充。此外,在海平面下降的背景下,陆地风化速度逐渐增加,陆源输入也相应呈增加趋势,进一步促成了碳同位素的负偏移。与此同时,甲烷气体与有机质在发生氧化反应的过程中,不断消耗海洋中的硫酸盐,因而产生大量的 ^{12}C ,也会导致碳同位素的负偏移(图9a)。随着海平面的逐渐上升,海洋水合物系统也呈相对稳定的趋势,甲烷释放和氧化反应等基本结束(图9b)。综上所述,火山活动及甲烷释放等因素足够引起海水碳同位素组成下降、全球变暖、生物大灭绝等。

5.2 氧同位素演化曲线

除了成岩作用对海相碳酸盐岩的氧同位素组成有影响之外,古海水组成及古温度也对其有重大影响。目前针对P/T界线附近氧同位素负漂移现象的研究较少,相关学者起初认为这是与氧同位素的不稳定性有关,随着类似现象的增多,如四川盆地东部的仰天窝剖面/中梁山剖面及西北部的广元上寺剖面(图1)均出现此现象,广元上寺剖面氧同位素值从-5.0‰降至-7.7‰^[17],表明这与成岩蚀变关系较小,何况在分析氧同位素组成前均经过严格的蚀变性评价,因此初步研究认为负漂移现象可能与地质事件有密切关联。

四川盆地及周边的云贵等地区在二叠世及早-中三叠世期间发生过大规模的火山活动,因而被国际学术界认同为国内唯一的大火成岩省。研究表明,P/T界线附近也发生过大规模的火山喷发,如四川盆地中梁山剖面、广元上寺剖面在飞仙关组底部就有3层以上的粘土岩存在^[40],经测试分析后认为是火山物质的产物,这也充分证明了火山事件的发生。受大规模火山活动的影响,可以造成局部海水古温度增高,从而使海相碳酸盐岩沉淀过程中氧同位素分馏系数发生改变,进而使其具有较轻的氧同位素组成。若将没有经成岩蚀变的海相碳酸盐岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值设为-5‰,沉淀温度设为25℃,可得出相应流体的 $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW)值大约为-

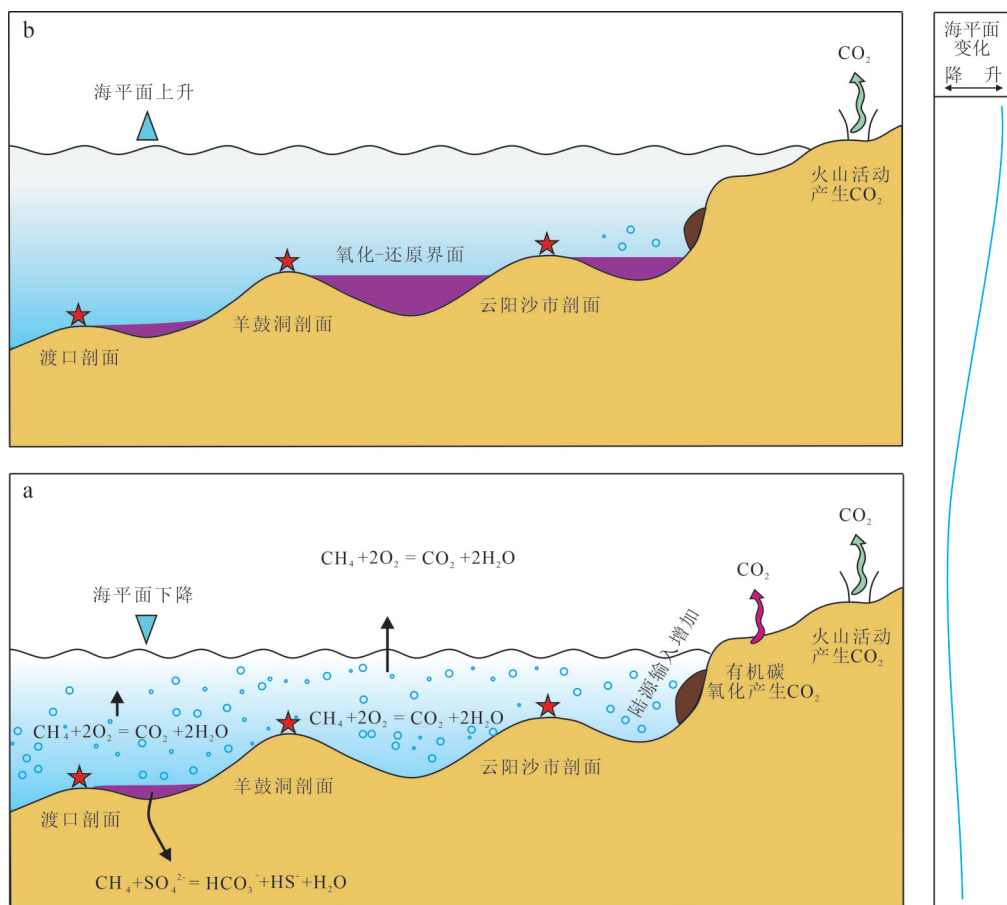


图9 川东北地区P/T界线处碳同位素负漂移成因模式

Fig. 9 Genetic model for negatively drifting carbon isotope values at the Permian/Triassic boundary, northeastern Sichuan Basin

a. 海平面下降时期碳同位素演化模式 b. 海平面上升时期碳同位素演化模式

3‰。按方解石-水系统 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 分馏系数表达方程计算： $10^3 \ln \alpha_{\text{方解石-水}} = 2.789 (\pm 0.017) \times 10^6/T^2 - 2.89 (\pm 0.08)$ ，假设 $\delta^{18}\text{O}$ 值设为 -7.00‰ ，那么沉淀温度为 36℃ 左右。而本次研究区云阳沙市剖面在P/T界线附近 $\delta^{18}\text{O}$ 最低值为 -8.44‰ ，按上述公式计算得出该样品对应的古海水温度为 44℃ 左右。这一温度比二叠纪末期上升了 17℃ ，此现象与黄思静等^[17]在研究川东地区开江-梁平海槽东西两侧剖面时得出的趋势一致，进一步表明P/T界线附近火山活动造成的古温度升高与氧同位素负漂移有密切关系。

6 结论

1) 依据样品蚀变性标准，选取对古海水信息保存较好的样品来建立研究区长兴组-飞仙关组碳酸盐岩同位素演化曲线。碳同位素组成在长兴期与海平面有较好的响应关系，长兴期海平面整体上显示为下降趋势，碳同位素值也相应呈明显下降趋势。进入P/T界线附近时，研究区3条剖面均发生碳同位素负漂移的

现象，下降幅度高达6‰。进入飞仙关期时，碳同位素值总体上表现出明显的上升趋势，在飞四段内部达到极大值后降低。

2) 研究区氧同位素组成在长兴期和飞仙关期时范围均落在Veizer等公布的同期海水的氧同位素分布区间内，但羊鼓洞剖面在飞仙关期时相较于其他剖面同期海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值具有相对较低的氧同位素组成。在进入P/T界线附近时，氧同位素值也发生了强烈的负漂移现象，在P/T界线附近达到了最低值。

3) 在综合岩石学、地球化学信息的基础上探讨了P/T界线附近碳、氧同位素负漂移现象的可能驱动机制，研究认为西伯利亚地区火山活动对P/T界线附近碳同位素负漂移影响较小，出现负漂移的主要原因可能与甲烷释放有关。P/T界线附近的氧同位素负漂移驱动机制可能与火山活动造成的古温度升高有关。

参 考 文 献

- [1] 马新华, 杨雨, 文龙, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩大中型气田分布规律及勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 1-13.

- Ma Xinhua, Yang Yu, Wen Long, et al. Distribution and exploration direction of medium-and large-sized marine carbonate gas fields in Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(1): 1-13.
- [2] 施振生,朱筱敏,张亚雄,等. 四川盆地上三叠统沉积储层研究进展与热点分析[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(4): 784-800.
- Shi Zhensheng, Zhu Xiaomin, Zhang Yaxiong, et al. Advances and trending topics in sedimentary reservoir research of the Upper Triassic Xujiahe Formation, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(4): 784-800.
- [3] 秦贞超,缪志伟,魏建新,等. 四川盆地元坝地区茅口组台缘浅滩相储层物理模型[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 652-660.
- Qin Zhenchao, Miu Zhiwei, Wei Jianxin, et al. Seismic physical model of the Maokou Formation reservoirs of platform-margin shoal in Yuanba area, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 652-660.
- [4] 黄长兵,黄泽贵,王小飞,等. 普光气田飞仙关组三段微生物碳酸盐岩储层特征及主控因素[J]. *大庆石油地质与开发*, 2021, 40(1): 17-25.
- Huang Changbing, Huang Zegui, Wang Xiaofei, et al. Characteristics and main controlling factors of the microbial carbonate reservoirs in the 3rd member of Feixianguan Formation in Puguang Gas Field [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(1): 17-25.
- [5] 祖克威,范凌霄,王波,等. 四川盆地普光地区嘉陵江组二段碳酸盐岩储层裂缝发育规律[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(6): 1188-1196.
- Zu Kewei, Fan Lingxiao, Wang Bo, et al. Development patterns of fractures in carbonate reservoirs in the 2nd member of Jialingjiang Formation, Puguang area, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(6): 1188-1196.
- [6] 刘景东,刘光祥,韦庆亮,等. 四川盆地元坝地区飞仙关组二段滩相储层孔隙演化特征[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2016, 40(1): 10-17.
- Liu Jingdong, Liu Guangxiang, Wei Qingliang, et al. Pore evolution characteristics of beach facies reservoir of Feixianguan II Member in Yuanba area, Sichuan Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2016, 40(1): 10-17.
- [7] 魏国齐,杨威,刘满仓,等. 鄂西-城口地区“海槽”西侧长兴组-飞仙关组台缘礁滩特征与展布[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 661-672.
- Wei Guoqi, Yang Wei, Liu Mancang, et al. Characteristics and distribution of platform-margin reef-shoal reservoirs in Changxing-Feixianguan Formations to the west of ocean trough, E'xi-Chengkou area [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 661-672.
- [8] 马永生,蔡勋育,李国雄. 四川盆地普光大型气藏基本特征及成藏富集规律[J]. *地质学报*, 2005, 79(6): 858-865.
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Li Guoxiong. Basic characteristics and concentration of the Puguang Gas Field in the Sichuan Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(6): 858-865.
- [9] 董庆民. 川东北地区长兴组-飞仙关组碳酸盐岩同位素地球化学响应特征及意义[D]. 湖北:长江大学, 2019.
- Dong Qingmin. The isotope geochemical response characteristics and significance of carbonate rocks in Changxing-Feixianguan Formation of northeastern Sichuan Basin [D]. Hubei: Yangtze University, 2019.
- [10] 邵红梅,卢曦,高波,等. 微区原位地球化学分析技术与应用——以古城地区碳酸盐岩储层成岩演化为例[J]. *大庆石油地质与开发*, 2019, 38(5): 160-168.
- Shao Hongmei, Lu Xi, Gao Bo, et al. Geochemical analyzing technique of the microzone's normal position and its application: A case study on the diagenetic evolution of the carbonate reservoir in Gucheng area [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2019, 38(5): 160-168.
- [11] 李祖兵,欧加强,陈轩,等. 川中地区下二叠统白云岩储层特征及发育主控因素[J]. *大庆石油地质与开发*, 2017, 36(4): 1-8.
- Li Zubing, Ou Jiaqiang, Chen Xuan, et al. Characteristics and main development controlling factors for Lower Permian dolomite reservoirs in Chuanzhong region [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2017, 36(4): 1-8.
- [12] 黄可可,黄思静,胡作维,等. 四川盆地宣汉渡口和重庆北碚下三叠统海相碳酸盐岩的碳同位素组成与演化[J]. *古地理学报*, 2016, 18(1): 101-114.
- Huang Keke, Huang Sijing, Hu Zuowei, et al. Carbon isotopic composition and evolution of the Lower Triassic marine carbonates from Dukou of Xuanhan and Beibei of Chongqing. Sichuan Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2016, 18(1): 101-114.
- [13] 黄思静,黄可可,钟怡江,等. 四川广安龙门峡南剖面下三叠统海相碳酸盐岩的碳同位素组成与对比[J]. *中国科学:地球科学*, 2017, 47(1): 57-71.
- Huang Sijing, Huang Keke, Zhong Yijiang, et al. Carbon isotope composition and comparison of Lower Triassic Marine carbonate rocks from Southern Long-menxia section in Guang'an, Sichuan Basin [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2017, 47(1): 57-71.
- [14] 黄思静. 上扬子地区二叠系—三叠系初海相碳酸盐岩的碳同位素组成与生物灭绝事件[J]. *地球化学*, 1994, 23(1): 60-68.
- Huang Sijing. Carbon isotopes of Permian and Permian-Triassic boundary in upper Yangtze Platform and the mass extinction [J]. *Geochimica*, 1994, 23(1): 60-68.
- [15] 马德芹,田景春,林小兵,等. 四川盆地二叠系长兴组生物礁发育的差异性及控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(6): 1176-1187.
- Ma Deqin, Tian Jingchun, Lin Xiaobing, et al. Differences and controlling factors of Changxing Formation reefs of the Permian in the Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(6): 1176-1187.
- [16] 武恒志,吴亚军,柯光明. 川东北元坝地区长兴组生物礁发育模式与储层预测[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(4): 645-657.
- Wu Hengzhi, Wu Yajun, Ke Guangming. Bioherm development model and reservoir prediction of Changxing Formation in Yuanba area, Northeastern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(4): 645-647.
- [17] 黄思静,李小宁,胡作维,等. 四川盆地东部开江—梁平海槽东西两侧三叠系飞仙关组碳酸盐岩碳氧同位素组成对比及古海洋学意义[J]. *地球化学*, 2016, 45(1): 24-40.
- Huang Sijing, Li Xiaoning, Hu Zuowei, et al. Comparison of carbon and oxygen isotopic composition of Feixianguan carbonates, Early Triassic, between east and west sides of Kaijiang-Liangping trough, Sichuan Basin, and the significance for paleoceanography

- [J]. *Geochimica*, 2016, 45(1): 24–40.
- [18] 胡忠贵. 川东—渝北地区石炭系白云岩成因与成岩系统研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
- Hu Zhonggui. Study of dolomite genesis and diagenesis system of Huanglong Formation of Carboniferous in Eastern Sichuan–Northern Chongqing area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.
- [19] 黄思静, 石和, 毛晓东, 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.
- [20] Horacek M, Brandner R, Abart R. Carbon isotope record of the P/T boundary and the Lower Triassic in the Southern Alps: Evidence for rapid changes in storage of organic carbon [J]. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2007, 252(1–2): 347–354.
- [21] 李国蓉, 刘正中, 谢子潇, 等. 四川盆地西部雷口坡组非热液成因鞍形白云石的发现及意义[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 164–176.
- Li Guorong, Liu Zhengzhong, Xie Zixiao, et al. Discovery of non-hydrothermal saddle-shaped dolomite in Leikoupo Formation, Western Sichuan Basin and its significance [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1): 164–176.
- [22] Derry L A, Keto L S, Jacobsen S, et al. Sr isotopic variations in Upper Proterozoic carbonates from Svalbard and East Greenland [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53: 2331–2339.
- [23] 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.
- [24] Kaufman A J, Jacobson S B, Knoll A H. The Vendian record of Sr and C isotopic variations in seawater: Implications for tectonics and paleoclimate [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 120(3–4): 409–430.
- [25] 王大锐, 冯晓杰. 渤海湾地区下古生界碳、氧同位素地球化学研究[J]. 地质学报, 2002, 76(3): 400–408.
- Wang Darui, Feng Xiaojie. Research on carbon and oxygen geochemistry of lower Paleozoic in North China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(3): 400–408.
- [26] 郭福生, 彭花明, 潘家永, 等. 浙江江山寒武系碳酸盐岩碳氧同位素特征及其古环境意义探讨[J]. 地层学杂志, 2003, 27(4): 289–297.
- Guo Fusheng, Peng Huaming, Pan Jiayong, et al. A probe into the carbon and oxygen isotopic characteristics of and the Cambrian carbonate rocks in Jiangshan, Zhejiang and its Paleoenvironment significance [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2003, 27(4): 289–297.
- [27] 张继庆, 李汝宁, 宫举铭, 等. 四川盆地及邻区晚二叠世生物礁[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1990.
- Zhang Jiqing, Li Runing, Gong Juming, et al. Late Permian biogenic reefs in the Sichuan basin and its adjacent areas [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1990.
- [28] 陈锦石, 邵茂茸, 霍卫国, 等. 浙江长兴二叠系和三叠系界限地层的碳同位素[J]. 地质科学, 1984, 19(1): 88–93.
- Chen Jinshi, Shao Maorong, Huo Weiguo, et al. Carbon Isotope of carbonate strata at Permian–Triassic boundary in Changxing, Zhejiang [J]. *Chinese Journal of Geology*, 1984, 19(1): 88–93.
- [29] Payne J L, Lehmann D J, Wei J Y, et al. The pattern and timing of biotic recovery from the End–Permian extinction on the Great Bank of Guizhou, Guizhou Province, China [J]. *Palaaios*, 2009, 21(1): 63–85.
- [30] 左景勋, 童金南, 邱海鸥, 等. 巢湖平顶山北坡剖面早三叠世碳、氧同位素地层学研究[J]. 地层学杂志, 2004, 28(1): 35–47.
- Zuo Jingxun, Tong Jinnan, Qiu Haiou, et al. New carbon and oxygen isotope stratigraphy of the Lower Triassic at northern Pingdingshan section of Chaohu, Anhui Province, China [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2004, 28(1): 35–40.
- [31] 左景勋, 童金南, 邱海鸥, 等. 下扬子地区早三叠世碳酸盐岩碳同位素组成的演化特征[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2006, 36(2): 109–122.
- Zuo Jingxun, Tong Jinnan, Qiu Haiou, et al. Carbon isotope composition of the Lower Triassic marine carbonates, Lower Yangtze region, South China [J]. *Science China Series D: Earth Science*, 2006, 36(2): 225–241.
- [32] Veizer J, Ala D, Azmy K, et al. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater [J]. *Chemical Geology*, 1999, 161(1): 59–88.
- [33] Sun Y D, Joachimski M M, Wignall P B, et al. Lethally hot temperatures during the Early Triassic greenhouse [J]. *Science*, 2012, 338(6105): 366–370.
- [34] Holser W T, Schonlaub H, Attrep M, et al. A unique geochemical record at the Permian/Triassic boundary [J]. *Nature*, 1989, 337: 39–44.
- [35] Heydari E, Hassanzadeh J, Wade W J, et al. Permian–Triassic boundary interval in the Abadeh section of Iran with implications for mass extinction: Part I–Sedimentology [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, 193(3–4): 405–423.
- [36] Kamo S L, Czamanske G K, Amelin Y, et al. Rapid eruption of Siberian flood–volcanic rocks and evidence for coincidence with the Permian–Triassic boundary and mass extinction at 251 Ma [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 214(1–2): 75–91.
- [37] Payne J L, Lehmann D J, Wei J Y, et al. Large perturbations of the carbon cycle during recovery from the End–Permian extinction [J]. *Science*, 2004, 305(5683): 506–509.
- [38] 李小宁. 川渝地区下三叠统海相碳酸盐岩的碳氧同位素研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- Li Xiaoning. Stable carbon and oxygen isotope composition of marine carbonate rocks of the Lower Triassic in Sichuan and Chongqing areas [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [39] Buffett B, Archer D. Global inventory of methane clathrate: sensitivity to changes in the deep ocean [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 227(3–4): 185–199.
- [40] 黄思静, 黄可, 吕杰, 等. 早三叠世海水的碳同位素组成与演化——来自四川盆地东部的研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(10): 1508–1522.
- Huang Sijing, Huang Keke, Lv Jie, et al. Carbon isotopic composition of Early Triassic marine carbonates, Eastern Sichuan Basin, China [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2012, 42(10): 1508–1522.

(编辑 张亚雄)