

# 贵州关岭下三叠统永宁镇组碳同位素化学地层 与海洋氧化事件

陈孝红 危 凯 张保民 程 龙

(武汉地质矿产研究所, 湖北 武汉 430205)

**摘要:** 贵州关岭永宁镇下三叠统上部永宁镇组碳同位素化学地层及其对比研究表明早三叠世晚期特提斯洋曾发生了稳定碳同位素组成 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) 的强烈波动, 且这一  $\delta^{13}\text{C}$  波动具有分布广泛和不受沉积相控制的特点。笔者分析和讨论了永宁镇组碳同位素化学地层与岩石地层、生物地层、层序地层和微量元素地球化学特征的关系, 指出特提斯地区下三叠统上部地层碳同位素组成受全球海平面变化、洋流循环模式和生物复苏等多因素的共同影响, 早三叠世晚期  $\delta^{13}\text{C}$  的强烈正异常是洋流循环模式改变引起大洋氧化和与此相关的生物复苏的结果。

**关键词:** 碳同位素化学地层; 大洋氧化事件; 永宁镇组; 早三叠世; 贵州

**中图分类号:** P597+.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2013)05-1466-08

越来越多的研究证明, 自二叠纪晚期开始, 地球上发生了多种地质事件, 包括可能的行星碰撞、大范围的海底甲烷释放、突然的温度升降以及火山活动和森林火灾等。这些地质事件的综合作用曾使得全球生态系统在短时间内发生严重崩溃, 并导致显生宙以来最大规模的生物集群绝灭和之后漫长的, 几乎跨越了整个早三叠世的海洋生态环境的修复和生物复苏过程<sup>[1-6]</sup>。

为了查明大绝灭之后生物复苏及其与古海洋环境的协同演化关系, 来自世界不同地区的地质学家对早三叠世海相碳酸盐岩地层稳定碳同位素进行了详细的研究, 精确建立了包括华南、伊朗、印度、意大利等在内, 几乎遍及整个特提斯洋以及泛大洋西缘不同古地理部位的完整的早三叠世稳定碳同位素变化曲线。并且发现在生物复苏阶段的早三叠世时期沉积的海相碳酸盐岩的碳同位素具有强烈震荡的特点<sup>[7-10]</sup>。然而迄今为止不同学者对于这一时期海洋环境中  $\delta^{13}\text{C}$  强烈震荡的原因和机制的看法不一<sup>[3, 9, 10]</sup>。为此, 本文选择华南三叠系标准剖面之一的贵州关

岭永宁镇三叠系剖面, 对碳酸盐岩发育的下三叠统永宁镇组进行了精细的碳、氧同位素地层及其与岩石、层序和化学地层的对比研究, 获得了早三叠世晚期 (Spathian 早期) 碳同位素强烈正异常与当时海洋充氧事件紧密相联的证据。由于华南板块在早三叠世时期位于东特提斯洋与西太平洋接壤的低纬-赤道附近<sup>[3, 9, 11]</sup>, 而生态系统崩溃时期所形成的特殊的、持久而广泛的海洋缺氧环境的改善是大绝灭之后海洋生态环境修复首先面临和必须解决的关键问题<sup>[12, 13]</sup>。因此, 这一发现对于重新认识下三叠统碳同位素强烈波动的原因, 以及分析二叠纪生物大绝灭之后生物复苏的时间和环境机制提供了新的重要证据。

## 1 剖面位置、岩石和层序地层

关岭永宁镇剖面位于上扬子西缘台地边缘内侧, 为稳定台地相沉积。该剖面是扬子地区三叠纪地层多重划分对比的标准剖面。从 20 世纪 60 年代开始就有专门的研究, 并在岩石地层、生物地层和年代地层划分对比以及层序地层和沉积相研究等方面取

收稿日期: 2012-12-14; 改回日期: 2013-04-18

基金项目: 中国地质调查局“关岭生物群特征及环境演化”项目 (1212010611603) 资助。

作者简介: 陈孝红, 男, 1964 年生, 研究员, 从事地层古生物研究工作; E-mail: yccxiaohong@163.com。

得了重要进展<sup>[14,15]</sup>,但未见有关该剖面稳定碳同位素和微量元素地球化学方面的研究和报道。

贵州关岭永宁镇剖面是扬子地台西南缘下三叠统上部永宁镇组的命名剖面,岩性上具有四分的特点(图1)。自下而上,第一段底部砾屑灰岩中的砾石与下伏飞仙关组顶部泥质灰岩相似,可能是后者风化沉积的产物,指示永宁镇组底部可能曾一度暴露在海平面之上。该段下部泥质灰岩和瘤状灰岩具有海平面上升快的沉积的特征。中上部泥晶灰岩中偶见鲕粒和砾屑,并伴有低角度楔状交错层理和粒序层理出现,说明该段上部沉积环境已经从早期水体平静的潮坪演化为具有底流和风暴活动的碳酸盐岩缓坡。顶部一层薄层状含较多小型腹足类化石薄层砾屑灰岩指示当时可能发生过短暂海退,接受局限盆地相沉积<sup>[13]</sup>。

永宁镇组二段下部为黑色薄层泥质灰岩、叶片状钙质泥岩。泥质灰岩中发育滑塌变形构造和滑塌角砾岩,泥岩中发育水平层理;中部为灰色中厚层状瘤状灰岩、泥晶灰岩,含菊石 *Tirolites spinosus* 等,上部为灰绿色薄层钙质泥岩夹浅灰色中厚层泥晶灰岩、紫红色钙质泥岩。顶部为泥质灰岩,产 *Neospathosus homeri* 带牙形石<sup>[14,15]</sup>。岩石和生物组合特征显示永宁组二段底部可能出现了碳酸盐台地缓坡的迅速沉没,并且在接受短暂的台地边缘斜坡相(薄层泥质灰岩)沉积之后,迅速转化为陆棚(叶片状钙质泥岩、瘤状灰岩)和陆棚盆地相(灰绿色、紫红色泥岩)的沉积。永宁镇组三段下部的岩性与二段顶部泥质灰岩渐变过渡,但以三段中部发育地震断层和风暴碎屑流的泥晶灰岩、砾屑灰岩层为标志,区内步入持续的海退发展阶段,先后沉积了永宁镇组三段上部灰色薄-中层状白云质灰岩和永宁镇组四段灰色厚层状细晶白云岩、岩溶角砾白云岩夹纹层状泥质白云岩、细晶白云岩。

## 2 稳定碳同位素地层特征及其对比

### 2.1 样品采集和测试

本文所测样品来自永宁镇—新铺的318国道旁的永宁镇组自然剖面。为了避免同沉积碎屑成分、成岩期后构造和大气降水以及风化作用对地层中碳酸盐岩同位素的影响,重点在泥质含量低、相对较纯的碳酸盐岩地层中采集未风化、没有方解石脉充填和破碎现象的碳酸盐岩标本。在厚572m的永宁镇组

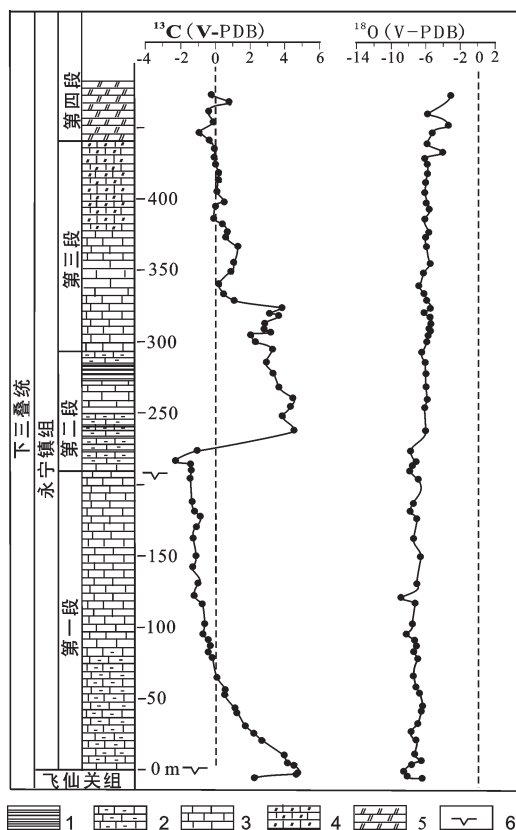


图1 永宁镇组碳、氧同位素变化曲线  
1—页岩;2—泥质灰岩;3—灰岩;4—白云质灰岩;5—白云岩;  
6—层序界面

Fig.1 Carbon and oxygen isotope profiles of Yongningzhen Formation

1—Shale; 2—Muddy limestone; 3—Limestone; 4— Dolomitic limestone; 5—Dolomite; 6—Sequence boundary

中非等间距采集有效样品82件(图1,表1)。碳、氧同位素测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室MAT-251上进行。参考标准为Vienna Pee Dee组的箭石(V-PDB)。重复测试分析精度:<sup>13</sup>C为 $\pm 0.1\%$ ,<sup>18</sup>O为 $\pm 0.2\%$ 。样品测试结果见表1。

### 2.2 稳定碳同位素化学地层及其对比

在测试的全部82件样品中,除了第四段和第三段的2个样品外,其余样品 $\delta^{18}\text{O}$ 值均位于 $-10\%$ ~ $-5\%$ 之间,而且 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值没有明显的相关性(图2),指示样品虽然遭受轻微蚀变作用,但均在可接受范围内<sup>[16]</sup>。

永宁镇组中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的垂向变化特点(图1)及其散点分布图(图2)显示永宁镇组一段的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对稳定,变化于 $-7.11\%$ ~ $-9.41\%$ ,绝大部分

表 1 永宁镇组碳酸盐岩同位素组成  
Table 1 Isotope compositions of carbonates in Yongningzhen Formation

序号	样品编号	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	序号	样品编号	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$
1	YN-1T	2.27	-7.13	42	YN-42T	2.96	-6.68
2	YN-2T	4.68	-8.92	43	YN-43T	3.30	-7.05
3	YN-3T	4.80	-9.24	44	YN-44T	2.34	-6.47
4	YN-4T	4.57	-8.22	45	YN-45T	2.06	-6.37
5	YN-5T	4.16	-7.19	46	YN-46T	3.20	-6.10
6	YN-6T	3.96	-7.77	47	YN-47T	2.85	-6.29
7	YN-7T	2.72	-7.71	48	YN-48T	2.81	-6.01
8	YN-8T	2.26	-8.24	49	YN-49T	3.66	-6.14
9	YN-9T	1.75	-7.48	50	YN-50T	3.08	-6.75
10	YN-10T	1.23	-7.17	51	YN-51T	3.86	-6.04
11	YN-11T	1.13	-7.11	52	YN-52T	1.08	-6.47
12	YN-12T	0.56	-7.31	53	YN-53T	0.43	-6.81
13	YN-13T	0.56	-7.69	54	YN-54T	0.19	-7.46
14	YN-14T	0.07	-8.13	55	YN-55T	0.87	-6.85
15	YN-15T	-0.15	-7.39	56	YN-56T	1.05	-6.14
16	YN-16T	-0.38	-7.93	57	YN-57T	1.26	-6.48
17	YN-17T	-0.34	-7.65	58	YN-58T	0.60	-6.57
18	YN-18T	-0.45	-7.86	59	YN-59T	0.66	-6.25
19	YN-19T	-0.77	-8.71	60	YN-60T	0.39	-6.53
20	YN-20T	-0.66	-8.16	61	YN-61T	-0.12	-6.75
21	YN-21T	-0.77	-7.75	62	YN-62T	-0.04	-6.22
22	YN-22T	-1.23	-9.41	63	YN-63T	0.50	-6.57
23	YN-23T	-1.03	-7.63	64	YN-64T	0.10	-6.76
24	YN-24T	-1.42	-7.50	65	YN-65T	0.18	-6.57
25	YN-25T	-1.13	-7.37	66	YN-66T	0.18	-6.42
26	YN-26T	-1.29	-8.09	67	YN-67T	-0.01	-6.42
27	YN-27T	-1.10	-7.76	68	YN-68T	-0.07	-6.53
28	YN-28T	-0.88	-7.71	69	YN-69T	-0.09	-4.67
29	YN-29T	-1.22	-8.27	70	YN-70T	-0.35	-6.46
30	YN-30T	-1.34	-8.03	71	YN-71T	-0.94	-5.87
31	YN-31T	-1.50	-7.41	72	YN-72T	-0.13	-3.97
32	YN-32T	-1.44	-8.47	73	YN-73T	-0.43	-6.33
33	YN-33T	-1.45	-8.11	74	YN-74T	0.75	-3.72
34	YN-34T	-2.34	-7.82	75	YN-75T	-0.26	-3.63
35	YN-35T	-1.07	-8.40	76	YN-76T	-1.60	-3.63
36	YN-36T	4.47	-6.64	77	YN-77T	0.28	-3.46
37	YN-37T	3.89	-6.60	78	YN-78T	1.01	-2.88
38	YN-38T	4.34	-6.73	79	YN-79T	-1.63	-9.56
39	YN-39T	4.44	-6.46	80	YN-80T	2.08	-1.80
40	YN-40T	3.60	-6.53	81	YN-81T	-1.89	-8.62
41	YN-41T	3.36	-6.55	82	YN-82T	3.06	-5.18

注:1~35 为永宁镇组一段,36~49 为永宁镇组二段,40~71 为永宁镇组三段,72~82 为永宁镇组四段。

在-8‰左右,但  $\delta^{13}\text{C}$  变化较大,从下部的 4.8‰向上递减到-2.34‰。永宁镇组二段和三段的  $\delta^{18}\text{O}$  较为接近,绝大部分在-6.5‰左右,较第一段的  $\delta^{18}\text{O}$  均有明显升高,但  $\delta^{13}\text{C}$  的变化在永宁镇第一段的  $\delta^{13}\text{C}$  变化范围内,只是第二段的  $\delta^{13}\text{C}$  总体较高,与一段底部的  $\delta^{13}\text{C}$  接近,变化于 2.06‰~4.4‰。三段下部的  $\delta^{13}\text{C}$  延续了二段  $\delta^{13}\text{C}$  的特点,但在三段上部发生了  $\delta^{13}\text{C}$  的迅速下降, $\delta^{13}\text{C}$  从 3.86‰左右迅速下降为 1.08‰,之后虽有  $\delta^{13}\text{C}$  的轻微上升,但从三段上部开始, $\delta^{13}\text{C}$  随地层变新而逐步震荡下降,直到永宁镇第四段。

综上,贵州关岭下三叠统上部永宁镇组的碳同位素地层具有底部和中部两个  $\delta^{13}\text{C}$  的强烈正异常和夹持期间一个  $\delta^{13}\text{C}$  负异常所形成强烈波动现象。区域上看,下三叠统上部地层  $\delta^{13}\text{C}$  存在强烈波动现象最早在贵州罗甸关刀剖面的同期地层中有所发现(图

3-B)<sup>[7]</sup>,而后又见及华南同期不同相区,如安徽巢湖(图 3-C)、贵州乐东、广西作登,凤山金牙<sup>[48,917]</sup>,以及国外,如西特提斯地区的意大利北部 L'Om Picol/Uomo 地区,特提斯洋岛链带内部的伊朗北部,西北部和中部地区以及特提斯洋南部大陆边缘地区的印度 Losar 剖面(图 3-D-F)<sup>[9,10]</sup>。精细的牙形石或菊石生物地层序列显示上述不同地区下三叠统上部的碳同位素强烈震荡,特别是 Smithian 底部  $\delta^{13}\text{C}$  的强烈正异常层位以及 Smithian/ Spathian 界线附近  $\delta^{13}\text{C}$  的正偏离出现的时间几乎可以在世界范围内对比<sup>[47,910]</sup>。因此,永宁镇组内部碳同位素组成( $\delta^{13}\text{C}$ )的剧烈波动显然不是区域性的现象,而是一个几乎遍及特提斯洋不同古地理部位,涉及到整个特提斯洋,乃至全球碳循环震荡的大区或全球性地质事件产物。

2.3 与岩石地层和层序地层的对比

对比分析永宁镇组碳同位素组成( $\delta^{13}\text{C}$ )及其

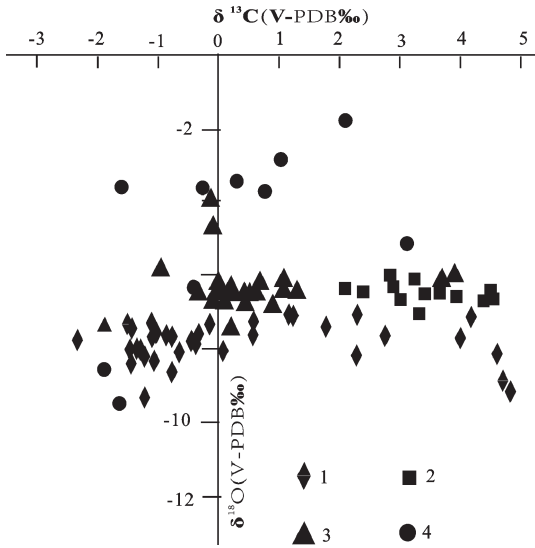


图 2 贵州关岭下三叠统永宁镇组碳酸盐岩的  $\delta^{18}\text{O}$ — $\delta^{13}\text{C}$  分布图  
1~4 分别对应永宁镇组内部的第一至第四段)

Fig.2 Cross-plots of carbon and oxygen isotopes from Lower Triassic Yongningzhen Formation, Guanling, Guizhou Province

1~4 correspond respectively to 1st Member to 4th Member in Yongningzhen Formation

与岩石和沉积关系不难发现,永宁镇组底部  $\delta^{13}\text{C}$  强烈正异常的出现与关岭地区当时的沉积环境从碎屑岩向碳酸盐岩转变紧密相关,而永宁镇组二段底部  $\delta^{13}\text{C}$  明显正偏离的出现则与同期地层中碎屑岩的出现紧密相联。但在永宁镇组一段内部,  $\delta^{13}\text{C}$  随地层中碳酸盐含量的升高反而下降,而永宁镇组三段中部  $\delta^{13}\text{C}$  的快速下降也与同期地层中泥质成分的消失无关。因此,地层中碳同位素的组成 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) 与岩性变化存在一定的联系,但又不完全受岩性的控制。结合前人有关扬子地台及邻区下三叠统层序地层研究成果 [15,18-21], 上述永宁镇组底部  $\delta^{13}\text{C}$  的正异常和永宁镇组一段下部  $\delta^{13}\text{C}$  值的负偏离恰好对应于 Smithian 底部层序地层转换面和 Smithian 早期持续的海侵沉积。换言之,特提斯地区奥伦尼克阶下部地层的  $\delta^{13}\text{C}$  受控于全球海平面变化,地层中  $\delta^{13}\text{C}$  随着海平面下降、海水变浅而上升。地层中  $\delta^{13}\text{C}$  随海平面变化的这种特点毫无疑问地支持前人关于早三叠世时期海洋存在海水分层,且表层水  $\delta^{13}\text{C}$  值较高,深部海水  $\delta^{13}\text{C}$  值较低的假设 [3,10]。但值得注意的是,永宁镇组一段下部

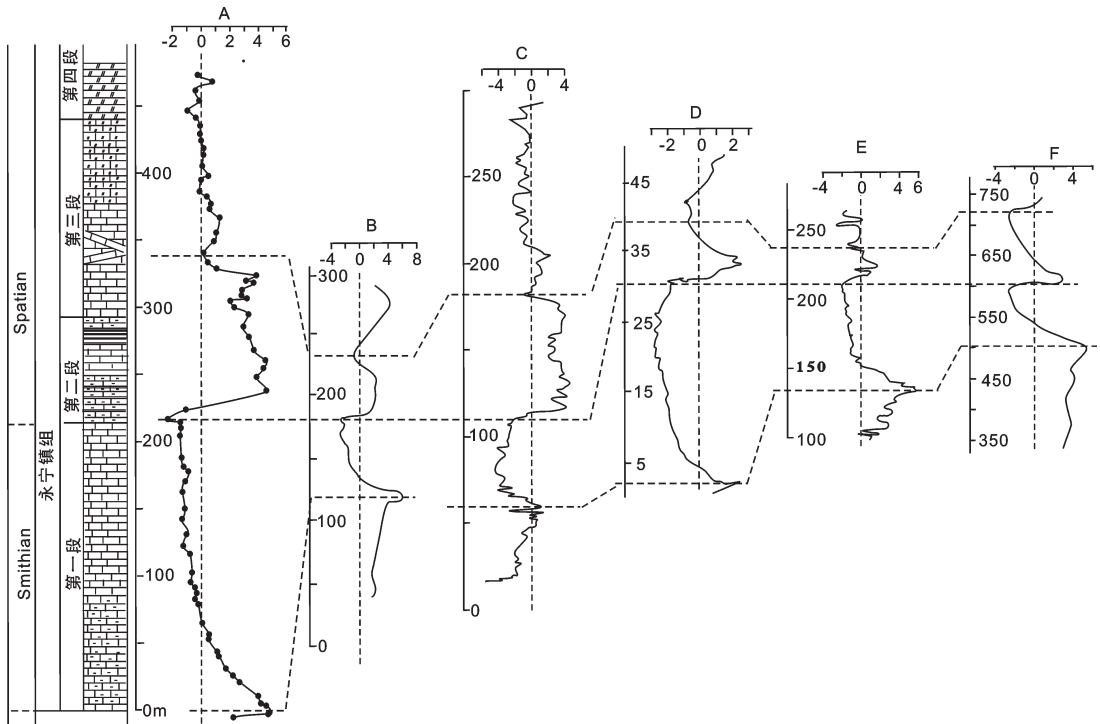


图 3 下三叠统碳同位素(‰)化学地层对比

A—贵州关岭永宁(本文);B—贵州罗甸关刀刀;C—安徽巢湖马家山<sup>[8]</sup>;D—印度 Losar<sup>[9]</sup>, E.伊朗 Zal<sup>[10]</sup>; F—意大利 Amol<sup>[9]</sup>

Fig.3 Lower Triassic carbon isotope correlation of chemo-stratigraphy

A—Yongning, Guanling, Guizhou (this paper); B—Guandao, Ludian, Guizhou<sup>[7]</sup>; C—Majiashan, Chaohu, Anhui, China<sup>[8]</sup>; D—Losar, India<sup>[9]</sup>, E—Zal, Iran<sup>[10]</sup>, F—Amol, Italy<sup>[9]</sup>



$\delta^{13}\text{C}$  随海平面变化的上述规律在永宁组第一段上部 and 上覆地层中并没有得到延续,相反,在永宁组第一段上部高水位沉积时期  $\delta^{13}\text{C}$  延续了之前负异常的状态,之后虽然在永宁镇组第一、二段界线附近出现了  $\delta^{13}\text{C}$  的明显正偏离,但永宁镇组二段的  $\delta^{13}\text{C}$  并没有随海平面上升或海水变深而下降,而是在相当长时间内(与牙形石 *N. crassatus* 带或 *N. homeri* 带下部相当)一直处于强烈正偏离状态。因此,如果地层中  $\delta^{13}\text{C}$  随海平面变化而变化或大洋海水  $\delta^{13}\text{C}$  分层的上述假设是成立的,那么在海平面继续上升,海水变深的 Spathian 早期(或永宁镇组二段)  $\delta^{13}\text{C}$  值一直维持强烈的正偏离的一个合理解释之一是该期发生了洋流循环模式的改变导致近岸、浅水环境的沉积物随洋流向远岸、深水环境搬运,以致海洋表层高  $\delta^{13}\text{C}$  值的水体随洋流循环进入大陆架甚至深水盆地,引起深水陆棚-盆地边缘环境  $\delta^{13}\text{C}$  值的突然升高和海底沉积物的氧化。事实上,早三叠世晚期(相当于 Smithian/ Spathian 界线附近)特提斯洋内部发生过洋流方向的改变不仅与古地理重建结果相一致<sup>[2]</sup>,而且为菊石的生物地理分区的结果所证实<sup>[11,23]</sup>。由于海洋充氧最直接的结果是改善充氧海洋的氧化还原条件,促进底栖生物,特别是底内生物生态空间的扩大及其繁盛,进而改变海洋有机碳存储方式,并影响整个海洋的碳同位素组成<sup>[9]</sup>。因此,从永宁镇组第二段

$\delta^{13}\text{C}$  强烈正异常地层位于含大量小型腹足类的灰岩层之上,与产丰富的菊石、双壳类、牙形石化石和大量遗迹化石的地层分布层位一致上看,永宁镇组第二段  $\delta^{13}\text{C}$  强烈正异常的形成还可能与海洋充氧所引起的海洋生物,特别是底栖生物的繁盛和活动所引起的有机质储存及其储存方式的改变有关<sup>[13]</sup>。

### 3 海相红层与海洋氧化事件

地史时期的大洋红层在白垩纪特提斯洋中广泛分布,并得到了深入的研究,被认为是大洋富氧条件下在大陆斜坡-远洋盆地沉积的产物<sup>[24,25]</sup>。有意义的是,本次研究发现在具有明显  $\delta^{13}\text{C}$  正异常的永宁镇第二段上部同样发育一套盆地边缘相的紫红色泥岩、泥灰岩,且该红层向东南延伸广泛出现在扬子台地西南边缘至南盘江盆地靠近扬子台地边缘一侧地区<sup>[26]</sup>,与白垩纪大洋红层的沉积环境接近。

为了进一步确定上述海相红层形成时期海洋的氧化还原条件,本次采集了上述永宁镇组二段上部和同期南盘江盆地边缘的贵州罗甸边阳关刀罗楼组上部紫红色泥岩、泥灰岩进行了微量元素含量测定(表 2)。经国土资源部中南岩矿检测中心检测表明上述两个剖面海相红层的 V/Cr 值介于 0.54~1.58 之间,平均值为 1.12。Ni/Cr 值除了永宁镇二段下部的 Yh-1 为 6.72 外,其余介于 2.09~4.34 之间,平均

表 2 下三叠统关刀罗楼组(Gh)与关岭永宁镇组(Yh)红层微量元素测试结果  
Table 2 Element composition of red bed from Lower Triassic Lulou Formation of Guandao (Gh), and Yongningzhen Formation of Guanling (Yh)

样品编号	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe O	Cr	Ni	Co	V	V/(V+Ni)	Ni/Co	V/Cr
Gh-5	0.086	2.55	51	26.6	11.8	57.2	0.68	2.25	1.12
Gh-4	1.71	1.11	46.1	30.2	9.07	48.5	0.62	3.33	1.05
Gh-3	1.66	1.58	47.6	26.6	11	52.8	0.66	2.42	1.11
Gh-2	0.612	0.745	24.3	25.6	6.04	22.9	0.47	4.24	0.94
Gh-1	0.04	0.914	21.8	23.9	5.51	22.6	0.49	4.34	1.04
Yh-7	0.537	0.395	26.2	32.1	7.99	18.9	0.37	4.02	0.72
Yh-6	8.44	5.74	128	80.7	38.6	202	0.71	2.09	1.58
Yh-5	8.99	2.2	151	51	19.4	174	0.77	2.63	1.15
Yh-4	8.5	2.23	135	56.7	20	165	0.74	2.84	1.22
Yh-3	8.93	2.1	177	65.4	21.1	253	0.79	3.10	1.43
Yh-2	6.9	1.74	161	65.9	21.3	240	0.78	3.09	1.49
Yh-1	0.351	0.522	25.2	32.1	4.78	13.5	0.30	6.72	0.54

注:氧化物单位为  $10^{-2}$ ,微量元素单位为  $10^{-6}$ 。

值为 3.12, 均指示他们形成于富氧环境<sup>[27,28]</sup>。岩石地球化学指标揭示永宁镇组第二段上部紫红色泥岩、泥灰岩层与白垩纪大洋红层一样, 是大洋富氧条件的产物。

需要说明的是, 由于上述关刀和永宁处于不同的古地理部位, 海水深度不同, 海底遭受氧化程度不同, 因此, 两个剖面上的海相红层在颜色、岩性、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{FeO}$  以及  $\delta^{13}\text{C}$  值等方面的表现也不完全一致。其中位于深水陆棚地区的永宁镇地区海底沉积物遭受较强烈的氧化, 因此红层为夹于灰黄色泥岩、泥灰岩之中的紫红色泥岩, 颜色纯正, 以  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量明显高于  $\text{FeO}$  的含量,  $\delta^{13}\text{C}$  具有明显正异常为特点。而同期位于远洋盆地中的关刀地区的海底沉积物受大洋充氧引起的氧化程度则较低, 红层主要表现为浅紫红色泥灰岩、灰泥岩与浅灰色灰岩的薄板状互层, 具有远洋高频沉积特点, 成分上以  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量略高或接近于  $\text{FeO}$  的含量,  $\delta^{13}\text{C}$  值相对较低为特点。此外, 在所测试的全部样品中, 除永宁镇组二段的 2 个样品 (红层底板样品 Yh-1 和红层顶部样品 Yh-7) 和关刀剖面的 2 个样品 (红层底部样品 Gh-1 和 Gh-2) 的  $V/(V+\text{Ni})$  值  $< 0.45$ , 指示富氧环境外, 其余样品的  $V/(V+\text{Ni})$  均大于 0.6。这显然是大洋富氧条件下, 海底有机质氧化形成  $V$  的有机络合物很有可能造成海相红层中  $V/(V+\text{Ni})$  值升高所致<sup>[29]</sup>。

## 参考文献 (References):

- [1] Holser W T, Schönlaub H P, Attrep J M, et al. A unique geochemical record at the Permian/Triassic boundary [J]. *Nature*, 1989, 337:39-44.
- [2] Becker L, Poreda R J, Basu A R, et al. Bedout: A possible End-Permian impact crater offshore of Northwestern Australia [J]. *Science*, 2004, 304:1469-1476.
- [3] Corsetti F, Baud A, Marengo P, et al. Summary of Early Triassic carbon isotope records [J]. *Comptes Rendus Palevol*, 2005, 4:473-486.
- [4] Tong Jinnan, Zhang Suxin, Zuo Jingxun, et al. Events during Early Triassic recovery from the end-Permian extinction [J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 55: 66-80.
- [5] Shen Shuzhong, Cao Changqun, Zhang Yichun, et al. End-Permian mass extinction and palaeoenvironmental changes in Neotethys: Evidence from an oceanic carbonate section in southwestern Tibet [J]. *Global and Planetary Change*, 2010, 73:3-14.
- [6] Shen Shuzhong, Crowley J L, Wang Yue, et al. Calibrating the End-Permian Mass Extinction [J]. *Science*, 2011, 334 (6061):1367-1372.
- [7] Payne J L, Lehmann D J, Wei J, et al. Large perturbations of the carbon cycle during recovery from the end-Permian extinction [J]. *Science*, 2004, 305:506-509.
- [8] 童金南, 赵来时, 左景勋, 等. 安徽巢湖地区下三叠统综合层序 [J]. *地球科学*, 2005, 30:40-46  
Tong Jinnan, Zhao Laishi, Zuo Jingxun, et al. An integrated Lower Triassic sequence in Chaohu, Anhui Province [J]. *Earth Science*, 2005, 30:40-46 (in Chinese, with English abstract).
- [9] Galfetti T, Bucher H, Brayard A, et al. Late Early Triassic climate change: Insights from carbonate carbon isotopes, sedimentary evolution and ammonoid paleobiogeography [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 243:394-411.
- [10] Horacek M, Richez S, Brandner R, et al. Evidence for recurrent changes in Lower Triassic oceanic circulation of the Tethys: The  $\delta^{13}\text{C}$  record from marine sections in Iran [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 252:355-369.
- [11] Brayard A, Escarguel G, Bucher H, et al. Smithian and Spathian (Early Triassic) ammonoid assemblages from terranes: Paleooceanographic and paleogeographic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 36:420-433.
- [12] Twitchett R J, Krystyn L, Baud A, et al. Rapid marine recovery after the End-Permian mass-extinction event in the absence of marine anoxia [J]. *Geology*, 2004, 32:805-808.
- [13] Fraiser M, Twitchett R, Bottjer D. Unique microgastropod biofacies in the Early Triassic: Indicator of long-term biotic stress and the pattern of biotic recovery after the end-Permian mass extinction [J]. *Palevol*, 2005, 4:475-484.
- [14] 杨守仁, 初庆春. 黔西南三叠系永宁镇组牙形石研究兼论下-中三叠统界线 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 1992, 28(6):722-732.  
Yang Shouren, Chu Qingchun. Study on the conodonts and division of Lower-Middle Triassic of Yongningzhen Formation, southwestern Guizhou [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1992, 28 (6):722-732 (in Chinese with English abstract).
- [15] 肖加飞, 魏家庸, 胡瑞忠. 扬子地台西南缘早三叠世层序地层格架 [J]. *沉积学报*, 2004, 22(2):310-318.  
Xiao Jiafei, Wei Jiayong, Hu Ruizhong. The Early Triassic sequence, stratigraphic framework in southwestern margin of Yangtze Platform [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(2): 10-318 (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 and Planetary Science Letters*, 1993, 120: 409–430.
- [17] 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):35–40,47.  
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 (in Chinese with English Abstract).
- [18] Wei Jiayong, Liao Nengmao, Yu Youyi. Triassic Transgressive – Regressive sequence in Guizhou– Guangxi region, South China[J]. *Journal of China University of Geoscience*, 1996, 7(1):112–121.
- [19] 田景春, 陈洪德, 彭军, 等. 川滇黔桂地区下、中三叠统层序对比及层序地层格架[J]. *沉积学报*, 2000, 18(2):198–204.  
Tian Jingchun, Chen Hongde, Peng Jun, et al. Sequence division, correlation and framework of Lower and Middle Triassic in Sichuan –Guizhou –Yunnan –Guangxi Region [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18 (2):198–204 (in Chinese with English abstract).
- [20] 梅冥相, 高金汉, 孟庆芬, 等. 南盘江盆地早—中三叠世层序地层格架及相对海平面变化研究 [J]. *现代地质*, 2002, 16(2): 137–146.  
Mei Mingxiang, Gao Jinhan, Meng Qingfen, et al. Sequence stratigraphy and relative sea –level changes from the Early to the Middle Triassic in the Nanpanjiang Basin [J]. *Geoscience*, 2002, 16 (2):137–146(in Chinese with English abstract).
- [21] 许效松, 刘宝君, 赵玉光. 扬子地台西缘二叠系–三叠系层序界面成因分析与盆山转换[J]. *特提斯地质*, 1996, 20: 1–30.  
Xu Xiaosong, Liu Baojun, Zhao Yuguang. Genesis of Sequence Boundary and basin–mountain transform on the western margin of the Yangtze platform during the Devonian to the Triassic [J]. *Geology of Tethys*, 1996, 20:1–30(in Chinese).
- [22] Yan Jiaxin, Zhao Kun. Permo –Triassic paleogeographic, paleoclimatic and paleoceanographic evolutions in eastern Tethys and their coupling[J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 44:968–978.
- [23] Bra yard A, Bucher H, Escarguel G, et al. The Early Triassic ammonoid recovery: Paleoclimatic significance of diversity gradients [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 239:374–395.
- [24] Hu Xiumian, Wang Chengshan, Li Xianghui, et al. Upper Cretaceous oceanic red beds in southern Tibet: Lithofacies, environments and colour origin [J]. *Science in China (Series D)*, 2006, 49(8):785–795.
- [25] 胡修棉, 王成善. 白垩纪大洋红层:特征、分布与成因[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(1):1–13.  
Hu Xiumian, Wang Chengshan. Cretaceous oceanic red beds: Characters, occurrences, and origin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(1):1–13(in Chinese with English abstract).
- [26] 贵州省地质矿产局. 贵州省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1987:1–698.  
Bureau of Geology and Mineral Resources of Guizhou Province. Regional geologic survey of Guizhou Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987:1–698(in Chinese).
- [27] Hatch J R, Leventhal J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis: Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U. S. A. [J]. *Chemical Geology*, 1992, 99:65–82.
- [28] Jones B J, Manning A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 1994, 111:111–129.
- [29] 程文斌, 顾雪祥, 胡修棉, 等. 大洋红层与大洋富氧事件[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2007, 26(增刊):256–257.  
Chen Wenbin, Gu Xuexiang, Hu Xiumian, et al. The oceanic red beds and the oxygen–enriched events [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2007, 26(supp.):256–257(in Chinese with English abstract).

## Carbon isotope chemo-stratigraphy and ocean oxidation event in the Lower Triassic Yongningzhen Formation of Guanling, Guizhou Province

CHEN Xiao-hong, WEI Kai, ZHANG Bao-ming, CHENG Long

(Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, Wuhan 430205, Hubei, China)

**Abstract:** High-resolution carbon isotope measurements of the upper Lower Triassic Yongningzhen Formation in Yongningzhen section of Guanling in Guizhou Province in correlation with contemporaneous strata in the world demonstrate that there is a pronounced carbon isotopic excursion characterized by wide distribution and unrestricted by sedimentary environment in the late Early Triassic of Tethys. The relationships of carbon chemo-stratigraphy to lithostratigraphy, biostratigraphy, sequence stratigraphy and trace element geochemistry of the Yongningzhen Formation are discussed in this paper. It is suggested that the  $\delta^{13}\text{C}$  variability of Tethys Ocean in the late Early Triassic was affected by global sea level change, oceanic circulation and biotic recovery as well as some other factors, and that a considerable  $\delta^{13}\text{C}$  positive excursion resulted from an extensive ocean oxidation caused by significant modification of oceanic circulation and biotic recovery related to the ocean oxidation event at that time.

**Key words:** carbon isotope chemostratigraphy; ocean oxidation; Yongningzhen Formation; Early Triassic; Guizhou

---

**About the first author:** CHEN Xiao-hong, male, born in 1964, senior researcher, mainly engages in the study of stratigraphy and paleontology; E-mail: yccxiaohong@163.com.