

陈孝红, 周鹏, 张保民, 等. 峡东埃迪卡拉系陡山沱组稳定碳同位素记录其年代地层意义[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 207-223.

Chen Xiaohong, Zhou Peng, Zhang Baoming, et al. Stable isotope records of the Ediacaran Doushantuo Formation in the eastern Yangtze Gorges and its significance for chronostratigraphy[J]. Geology in China, 2015, 42(1): 207-223(in Chinese with English abstract).

峡东埃迪卡拉系陡山沱组稳定碳同位素记录 及其年代地层意义

陈孝红 周 鹏 张保民 王传尚

(中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430223)

摘要: 基于峡东秭归青林口、泗溪和宜昌晓峰河埃迪卡拉系下部陡山沱组剖面岩石、层序和精细的碳同位素地层研究, 在埃迪卡拉系下部陡山沱组底部、下部、中部、上部和顶部分别识别出 5 次以灰岩出现或黑色页岩增厚为标志的海侵事件, 划分出 5 个可以进行区域对比的三级层序, 自下而上分别命名为 BDSS, LDSS, MDSS, UDSS 和 TDSS。以层序界面为对比标志, 峡东埃迪卡拉纪不同古地理部位碳同位素组成变化的对比显示峡东埃迪卡拉系陡山沱组中内部发育 5 次可以进行区域乃至全球对比的碳同位素负异常, 分别是分布在 BDSS 下部的 SN1, LDSS 上部的 SN2, MDSS 上部和顶部的 SN3 和 SN4, 以及分布在 UDSS 上部的 SN5。其中 SN1 和 SN4 碳同位素负偏离最为明显, 最小 $\delta^{13}\text{C}$ 分别达到 $-4\text{‰} \sim -5\text{‰}$ 和 $-9\text{‰} \sim -10\text{‰}$, 分别与 Marinoan 冰期上覆盖帽白云岩以及 Gaskier 冰碛沉积上、下地层中的碳同位素组成特点接近。SN4 是埃迪卡拉系最晚冰期的产物。与 SN1 是埃迪卡拉系底界划分对比的标志相对比, SN4 的出现应该是埃迪卡拉系内部再划分中另一个不可忽视的界线标志。

关键词: 陡山沱组; 碳同位素地层; 年代地层; 埃迪卡拉系; 长江三峡

中图分类号: P597.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)01-0207-17

Stable isotope records of the Ediacaran Doushantuo Formation in the eastern Yangtze Gorges and its significance for chronostratigraphy

CHEN Xiao-hong, ZHOU Peng, ZHANG Bao-ming, WANG Chuan-shang

(Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430223, Hubei, China)

Abstract: The litho-, sequence and high-resolution stable isotopic stratigraphy of the Lower Ediacaran Doushantuo Formation in the Qinglingkou segment as well as Zigui, Xiaofeng and Sixi segments of Yichang were studied in this paper. Five transgressive events characterized by the occurrence of limestone or thickened black shale and five third-order sequences in ascending order named BDSS, LDSS, MDSS, UDSS and TDSS were recognized in the base, lower, middle, upper and top parts of the Lower Ediacaran Doushantuo Formation. According to the features of the sequence boundary, the correlations of the $\delta^{13}\text{C}$ profile between different geographic positions of the Ediacaran Doushantuo Formation in the eastern Yangtze Gorges indicate that there are five

收稿日期: 2013-12-27; 改回日期: 2014-03-12

基金项目: 中国地质调查局项目(1212011121103)资助。

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

negative $\delta^{13}\text{C}$ excursions, which are comparable in the region and even in the global scale. They are SN1 in the lower part of the BDSS, SN2 in the upper part of the LDSS, SN3 and SN4 in the upper and top parts of the MDSS, and SN5 in the upper part of the UDSS. Among them, the negative $\delta^{13}\text{C}$ excursions of the SN1 and SN4 are most obvious, their minimum $\delta^{13}\text{C}$ are separately close to -4‰ to -5‰ and -9‰ to -10‰ , and separately very similar to data of the carbon isotope in the cap dolostone overlaying the Marinoan tillite and the strata related to the Gaskier glacial period. The formation of the SN4 was attributed to the results of Gaskier glacial period. A comparison with the significance of the SN1 as the mark of the basal Ediacaran System shows that SN4 might have been another important boundary mark in the subdivision of the Ediacaran System.

Key words: Doushantuo Formation; carbon isotope; chronostratigraphy; Ediacara System; Yangtze Gorges

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

长江三峡东部地区埃迪卡拉系出露广泛,分布稳定,且以碳酸盐岩沉积为主,并产微体胚胎化石、宏体藻类、软躯体动物和管状动物等各门类化石。在岩石地层和层序地层^[1-2]、稳定碳同位素化学地层^[3-14]、生物地层^[9, 15-19]和同位素地质年代学^[20-22]等方面具有悠久的历史 and 很高的研究水平。然而,由于受人们对埃迪卡拉纪生物生命形式的认知能力以及当时生物本身化石化条件等原因的制约,虽然埃迪卡拉系中有多门类化石存在,但目前地层古生物学家尚不能象显生宙那样利用化石组合进行埃迪卡拉纪不同相区地层的精细划分和对比。以致至今为止人们尚不能获得一个满意的全球性,甚至是区域性的埃迪卡拉系年代地层系统。由于碳酸盐碳同位素综合记录了地史时期海平面变化、古地理、古气候和古环境变化的信息,因此,本文拟通过对峡东地区埃迪卡拉纪早期不同相区典型剖面精细的稳定碳同位素地层学及其与岩石、生物和层序地层的对比研究,寻找和确定埃迪卡拉系这一时期年代地层划分对比的标志,进而为埃迪卡拉纪年代地层系统的建立提供依据。

1 区域地质简述

长江三峡地区在大地构造位置上位于扬子地台北部。区内埃迪卡拉系成环带状分布在黄陵穹隆周缘(图1)。自李四光、赵亚曾^[1]最早将区内埃迪卡拉系自下而上划分为陡山沱统和灯影灰岩,后经刘鸿允等^[23]修订为下部陡山沱组和上部灯影组后沿用至今。陡山沱组以白云岩、碳质泥质粉砂岩发育为特点,岩石组合在纵向分布上具有明显的四分性特征^[2],横向也存在一定的相变特点。其中黄陵穹隆东翼,如宜昌三斗坪、莲沱、晓峰至樟村坪一带,

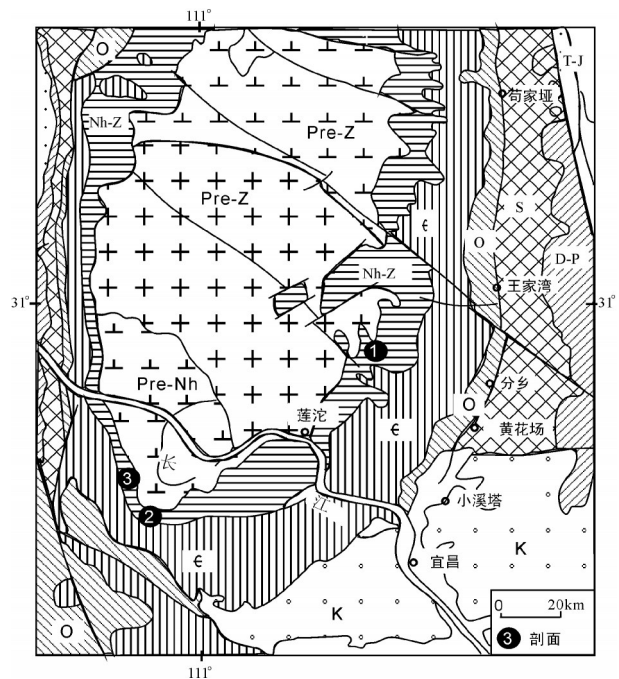


图1 峡东地区地质简图与剖面分布位置示意图
(据文献[24]修改)

陡山沱组剖面名称: 1—晓峰河剖面; 2—泗溪剖面; 3—青林口剖面

Fig.1 Generalized geological map of the eastern Yangtze Gorges (modified after reference [24])

Sections of Doushantuo Formation: 1—Xiaofeng River; 2—Sixi; 3—Qinglingkou

陡山沱组二段中、上部炭质、泥质碎屑沉积相对发育,而西翼至泗溪、黄牛岩和秭归一带相变为炭质泥质碎屑与白云岩互层。在陡山沱组标准剖面上以及黄陵西翼第四段发育的黑色碳质、硅质页岩在东翼相变为薄层状含硅磷质结核或条带白云岩。

2 研究方法

本次研究针对黄陵东翼和西翼沉积相的差异

和埃迪卡拉系碳同位素研究程度的不同, 在黄陵穹隆不同古地理部位分别选取剖面连续、露头新鲜, 碳酸盐岩相对发育、相关地层学(岩石地层、生物地层和层序地层)研究程度高的剖面, 包括西翼的秭归青林口剖面、东翼的宜昌晓峰河剖面以及介于上述两者之间的秭归泗溪剖面的陡山沱组为重点进行精细的碳同位素地层划分与对比研究(图1), 以进一步确定碳同位素组成变化与生物和海平面变化事件的关系。同位素样品采集尽量采集没有遭受构造影响的新鲜碳酸盐岩, 样品间隔控制在20 cm左右。考虑到吕苗等^[10]研究和报道了秭归泗溪陡山沱组第三段至灯影组的碳同位素组成特征, Zhu et al.^[8]和 Xiao et al.^[14]先后研究和报道了晓峰河地区陡山沱组或其部分层、段的碳同位素组成特点, 因此, 本次所涉及到的上述两个地区剖面的碳同位素样品测试由武汉地质调查中心同位素地球化学实验室完成。秭归青林口陡山沱组碳、氧同位素样品的测试则交由中国地质大学地质过程与矿产资源重点实验室测试完成。上述二个单位的同位素比值测试均在MAT-251进行, 中国地质大学采用的参考标准为Vienna Pee Dee组的箭石(V-PDB), 武汉地调中心的参考标准为Pee Dee组的箭石(PDB)。重复分析的结果表明碳酸盐岩¹³C的分析精度均为 $\pm 0.1\%$ 。

3 研究结果

3.1 秭归泗溪剖面

秭归泗溪剖面位于黄陵穹隆西南翼(图1), 湖北秭归泗溪风景区门口。剖面沿秭归泗溪河道两侧出露。除陡山沱组第二段下部因河床冲积物掩盖而出露不完整外, 其余层段出露完整, 露头新鲜。岩性上以白云岩或白云岩与黑色页岩互层发育为特点。与标准的陡山沱组相比, 标准剖面上陡山沱组二段中一上部数十米厚的粉砂质泥岩不发育, 代之以含磷结核的炭质泥岩夹(互)白云岩。以灰岩的出现或黑色页岩的变厚为标志, 大致可以将陡山沱组划分为5个海侵-海退沉积旋回或层序(图2)。

对秭归泗溪埃迪卡拉系剖面的研究和报道的时间并不长。陈孝红等^[4]和吕苗等^[10]先后研究和报道了秭归泗溪埃迪卡拉系灯影组的地层和碳同位素组成特点, 后McFadden et al.^[18]研究和报道了该剖面陡山沱组的疑源类。鉴于该剖面陡山沱组第

三段上部碳同位素组成与黄牛岩一带陡山沱组三段的碳同位素组成差别明显^[5, 8, 10], 因此, 本次研究在对陡山沱组第三段重新进行碳同位素组成变化重复研究的同时, 重点开展陡山沱组第一段和二段碳同位素地层的精细研究。

本次研究在陡山沱组连续采集样品230件, 测试结果显示陡山沱组一段白云岩的碳同位素与国外同期盖帽白云岩特征相似(表1, 图2), 具有明显的负异常特点^[25-30]。该段内部最大 $\delta^{13}\text{C}$ 负偏离位于该段的中下部(C2层), 为 -4.33% 。由此向上 $\delta^{13}\text{C}$ 逐渐增大, 至该段近顶部时, $\delta^{13}\text{C}$ 值由 -0.32% 突然升高至 3.84% 。陡山沱组二段下部地层因河床掩盖而出露较差, 仅获得紧邻的2个岩层的 $\delta^{13}\text{C}$, 下层位的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -3.16% , 上层位的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 1.27% 。前者可能代表盖帽白云岩碳同位素负偏离(SN1)之后的另一次碳同位素组成负偏离(SN2)。陡山沱组二段中上部地层中的 $\delta^{13}\text{C}$ 具有震荡下降的趋势, 并在陡山沱组上部和顶部出现2次明显的 $\delta^{13}\text{C}$ 负异常(SN3, SN4), 其中前一次的负偏离形成的最小 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -4.34% , 后一次负偏离形成的最小 $\delta^{13}\text{C}$ 达 -9.59% , 具有更为明显的负偏离特点。陡山沱组二段顶部出现 $\delta^{13}\text{C}$ 的迅速升高, 并在陡山沱组三段下部出现 $\delta^{13}\text{C}$ 明显正异常, 最大 $\delta^{13}\text{C}$ 达 5.32% 。此后, 伴随地层中钙质含量的增加而逐步下降, 形成了陡山沱组第五次碳同位素负偏离(SN5)。陡山沱组三段上部 $\delta^{13}\text{C}$ 相对稳定, 在 0% 附近轻微波动, 变化于 -0.69% 至 0.31% 。总体上看, 泗溪陡山沱组的碳同位素组成可以概括为5次 $\delta^{13}\text{C}$ 负偏离(SN1~SN5)。从这些负偏离分布的相对地层位置上看, SN1, SN3和SN5大致与Jiang et al.^[5]的EN1, EN2和EN3对比, 与Zhu et al.^[7, 8]的CANCE, BAINCE和DOUNCE相当, N2与Zhu et al.^[7, 8]的WANCE大致对比, N4在以往的研究中较少被发现, 但在秭归泗溪剖面上, 此次碳同位素负偏离是埃迪卡拉系陡山沱组所存在的最大 $\delta^{13}\text{C}$ 负偏离。

3.2 宜昌晓峰河陡山沱组剖面

随着休眠卵动物化石在晓峰河地区陡山沱组中的发现^[16], 有关晓峰地区陡山沱组的生物地层和碳同位素化学地层的研究引起了国内外同行的高度重视^[6, 8, 14, 17, 19]。但由于该地缺乏标准剖面上陡山沱组第四段的典型岩性, 黄陵西南翼所见的陡山沱组第四段在该区究竟是缺失还是相变成其他沉积

表1 秭归泗溪剖面样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$
Table 1 $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of samples from the Sixi section, Zigui

样品号	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	样品号	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	样品号	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$
Zd1-2-1T	-4.33	-8.92	Z1d2-20-11T	3.2	-3.22	Z1d2-29-3T	-0.83	-1.97
Zd1-2-2T	-2.74	-7.14	Z1d2-20-12T	2.63	-4.17	Z1d2-29-4T	-1.79	-1.67
Zd1-3-1T	-3.4	-6.68	Z1d2-21-1T	4.47	-2.81	Z1d2-30-1T	-2.11	-2.42
Zd1-3-2T	-3.45	-7.02	Z1d2-21-3T	2.74	-3.34	Z1d2-30-2T	-5.59	-2.2
Z1d1-4-1T	-4.32	-8.04	Z1d2-21-4T	2.6	-3.37	Z1d2-30-3T	-5.99	-1.87
Z1d1-4-2T	-3.4	-9.97	Z1d2-21-5T	2.73	-3.47	Z1d2-30-4T	-8.6	-2.12
Z1d1-5-1T	-3.52	-7.26	Z1d2-21-6T	2.51	-3.63	Z1d2-30-5T	-6.64	-2
Z1d1-5-2T	-2.5	-7.79	Z1d2-21-7T	2.81	-2.91	Z1d2-30-6T	-9.59	-2.57
Z1d1-6-1T	-0.34	-8.18	Z1d2-21-9T	2.34	-3.5	Z1d2-31-1T	-5.29	-2.22
Z1d1-6-2T	3.84	-3.34	Z1d2-21-10T	-0.55	-3.05	Z1d2-31-2T	-5.49	-2.03
Z1d1-7-1T	1.44	-2.92	Z1d2-21-12T	2.02	-2.57	Z1d2-32-1T	-4.76	-1.96
Z1d2-12-1T	-3.16	-9.68	Z1d2-21-13T	1.98	-2.72	Z1d2-32-2T	-4.46	-2.04
Z1d2-12-2T	1.27	-7	Z1d2-21-15T	0.34	-2.67	Z1d2-32-3T	-5.38	-1.76
Z1d2-14-1T	4.05	-5.01	Z1d2-22-1T	-3.51	-2.63	Z1d2-33-1T	-2.9	-1.87
Z1d3-14-3T	4.68	-5.19	Z1d2-22-2T	-1.86	-1.96	Z1d2-33-2T	-3.08	-2.19
Z1d2-14-5T	4.45	-5.43	Z1d2-22-3T	-2.53	-2.01	Z1d2-33-3T	-3.4	-2.25
Z1d2-14-7T	4.18	-4.86	Z1d2-22-4T	-2.51	-3.13	Z1d3-34-1T	0.5	-3.14
Z1d2-15-1T	2.27	-4.78	Z1d2-22-5T	-1.28	-2.11	Z1d3-34-2T	0.66	-3.48
Z1d2-15-4T	3.59	-4.34	Z1d2-23-1T	-4.34	-1.88	Z1d3-34-3T	1.18	-3.93
Z1d2-16-1T	3.78	-4.72	Z1d2-23-2T	-3.9	-2.23	Z1d3-34-4T	1.89	-3.52
Z1d2-17-2T	2.38	-4.36	Z1d2-23-3T	-4.06	-2.38	Z1d3-34-5T	2.19	-3.69
Z1d2-17-3T	3.67	-5.76	Z1d2-23-4T	-3.5	-1.8	Z1d3-35-1T	3.34	-3.78
Z1d2-17-4T	3.57	-5.6	Z1d2-24-2T	-2.68	-1.84	Z1d3-35-2T	3.55	-3.05
Z1d2-17-5T	3.26	-5.81	Z1d2-24-3T	-2.83	-3.35	Z1d3-35-3T	4.57	-3.69
Z1d2-17-6T	3.57	-5.15	Z1d2-24-4T	-2.08	-2.78	Z1d3-35-4T	5.17	-4.6
Z1d2-17-7T	1.98	-3.03	Z1d2-25-1T	-1.54	-2.93	Z1d3-35-5T	4.57	-3.06
Z1d2-17-8T	3.46	-3.91	Z1d2-25-2T	-0.92	-2.12	Z1d3-35-6T	4.13	-3.69
Z1d2-17-9T	2.22	-4.06	Z1d2-25-3T	0.35	-2.38	Z1d3-36-1T	2.53	-2.42
Z1d2-17-10T	3.16	-5.2	Z1d2-25-4T	0.48	-2.91	Z1d3-36-2T	2.22	-5.41
Z1d2-17-11T	2.69	-4.65	Z1d2-25-5T	1.64	-3.34	Z1d3-37-1T	1.46	-3.51
Z1d2-17-12T	3.81	-4.95	Z1d2-26-1T	1.7	-2.53	Z1d3-37-2T	2.02	-3.56
Z1d2-19-1T	3.76	-5.17	Z1d2-26-2T	-1.2	-2.6	Z1d3-37-3T	2.82	-3.58
Z1d2-19-3T	3.84	-5.15	Z1d2-26-3T	-0.66	-2.6	Z1d3-37-4T	2.77	-3.47
Z1d2-19-4T	4.17	-4.96	Z1d2-26-4T	-0.47	-3.65	Z1d3-37-5T	3.6	-2.53
Z1d2-19-5T	3.24	-4.95	Z1d2-27-1T	1.55	-2.46	Z1d3-37-6T	5.32	-6.88
Z1d2-20-1T	3.6	-5.69	Z1d2-27-2T	0.58	-2.13	Z1d3-37-7T	4.52	-7.87
Z1d2-20-2T	3.34	-5.12	Z1d2-28-1T	1.15	-4.17	Z1d3-37-8T	3.52	-3.06
Z1d2-20-4T	2.92	-5.8	Z1d2-28-2T	0.5	-3.45	Z1d3-37-9T	4.41	-4.24
Z1d2-20-5T	3.42	-4.94	Z1d2-28-3T	1.52	-2.61	Z1d3-37-10	2.73	-4.55
Z1d2-20-6T	3.41	-4.96	Z1d2-28-4T	1.36	-2.49	Z1d3-37-11T	3.48	-7.16
Z1d2-20-7T	2.81	-6.05	Z1d2-28-5T	-0.3	-2.71	Z1d3-37-12T	4.27	-3.16
Z1d2-20-8T	4.33	-3.43	Z1d2-28-6T	-1.37	-3.58	Z1d3-38-1T	3.68	-3.88
Z1d2-20-9T	2.03	-4.03	Z1d2-29-1T	-1.5	-1.93	Z1d3-38-2T	4.03	-3.29
Z1d2-20-10T	2.45	-3.34	Z1d2-29-2T	-2.38	-1.25	Z1d3-38-3T	4.29	-3.32

续表1

样品号	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	样品号	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	样品号	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$
Z1d3-38-4T	3.51	-2.53	Z1d3-43-2T	-0.30	-4.16	Z1d3-43-20T	-0.16	-2.12
Z1d3-38-5T	3.73	-3.33	Z1d3-43-3T	0.18	-3.04	Zd3-44-8T	-0.34	-1.99
Z1d3-38-6T	2.56	-5.13	Z1d3-43-4T	-0.12	-0.96	Zd3-44-9T	-0.43	-1.27
Z1d3-39-1T	3.26	-4.88	Z1d3-43-5T	-0.11	-3.44	Zd3-44-10T	-0.47	-1.86
Z1d3-39-2T	3.64	-4.27	Z1d3-43-6T	-0.19	-4.06	Zd3-44-11T	-0.47	-2.46
Z1d3-39-3T	3.32	-4.40	Z1d3-43-7T	0.00	-4.32	Zd3-44-12T	-0.52	-2.17
Z1d3-39-4T	3.34	-3.87	Z1d3-43-8T	-0.24	-3.45	Zd3-44-13T	-0.65	-1.08
Z1d3-39-5T	2.61	-3.85	Z1d3-43-9T	0.12	-2.90	Zd3-44-14T	0.06	-0.54
Z1d3-39-6T	3.03	-4.45	Z1d3-43-10T	-0.13	-3.23	Zd3-44-15T	-0.32	-1.15
Z1d3-39-7T	3.52	-4.29	Z1d3-43-11T	-0.25	-2.71	Zd3-44-16T	-0.19	-2.70
Z1d3-39-8T	2.82	-4.90	Z1d3-43-12T	-0.11	-2.35	Zd3-44-17T	-0.06	-4.33
Z1d3-39-9T	2.26	-5.37	Z1d3-43-13T	-0.20	-2.12	Zd344-18T	-0.23	-3.37
Z1d3-39-10T	2.55	-5.45	Z1d3-43-14T	-0.42	-4.30	Zd344-19T	-0.23	-2.84
Z1d3-39-11T	2.69	-5.24	Z1d3-43-15T	-0.20	-3.68	Zd3-44-20T	-0.42	-1.90
Z1d3-39-12T	2.67	-4.17	Z1d3-43-16T	-0.25	-2.66	Zd3-44-21T	-0.34	-1.36
Z1d3-40-1T	2.35	-3.95	Z1d3-43-17T	-0.09	-3.54	Zd3-44-22T	0.00	-2.23
Z1d3-40-2T	0.75	-5.09	Z1d3-43-18T	-0.56	-0.16	Zd344-23T	0.21	-1.88
Z1d3-40-3T	0.77	-4.95	Z1d3-43-19T	-0.24	-0.33	Zd344-24T	-0.15	-0.53
Z1d3-40-4T	0.81	-5.01	Zd3-43-20T	-0.48	-1.32	Zd3-44-25T	-0.04	-1.68
Z1d3-40-5T	1.27	-5.78	Zd3-43-21T	-0.24	-1.43	Zd3-44-26T	-0.17	-0.45
Z1d3-40-6T	0.44	-5.64	Zd3-43-22T	-0.34	-0.99	Zd3-44-27T	0.11	-2.65
Z1d3-40-7T	1.20	-4.98	Zd3-43-23T	-0.25	-0.96	Zd3-44-28T	-0.22	-0.80
Z1d3-40-8T	0.62	-5.00	Zd3-43-24T	-0.15	-3.62	Zd3-45-1T	-0.62	-2.16
Z1d3-40-9T	0.29	-4.49	Zd3-43-25T	-0.12	-3.44	Zd3-45-2T	-0.69	-1.82
Z1d3-40-10T	0.68	-3.23	Zd3-43-26T	-0.10	-4.25	Zd3-45-3T	0.14	-2.84
Z1d3-40-11T	-0.04	-4.97	Zd3-43-27T	-0.17	-2.65	Zd3-47-1T	1.46	-1.19
Z1d3-40-12T	-0.13	-5.45	Zd3-44-1T	0.10	-2.49	Zd3-47-2T	2.71	-3.96
Z1d3-40-13T	-0.35	-4.32	Zd3-44-2T	-0.17	-2.98	Zd3-47-3T	4.32	-5.77
Z1d3-40-14T	-0.46	-4.14	Zd3-44-3T	-0.12	-3.20	Zd3-47-4T	2.13	-1.54
Z1d3-41-1T	-0.28	-2.57	Zd3-44-4T	-0.36	-0.85	Zd3-47-5T	1.42	-2.31
Z1d3-42-1T	0.09	-5.26	Zd3-44-5T	0.03	-0.57	Zd3-47-6T	1.54	-2.20
Z1d3-42-2T	0.29	-4.46	Zd3-44-6T	-0.23	-3.23	Zd3-47-7T	1.58	-2.06
Z1d3-43-1T	-0.29	-4.32	Zd3-44-7T	0.31	-3.11			

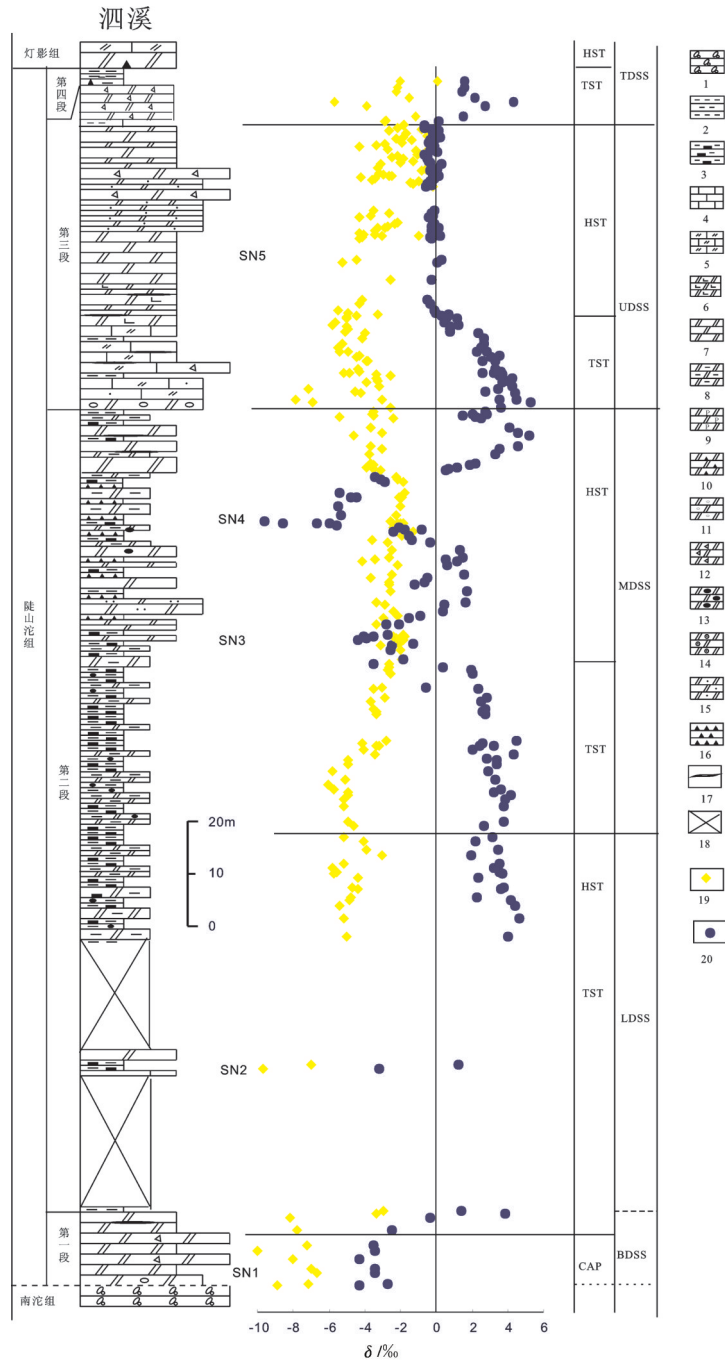


图2 秭归泗溪陡山沱组岩石地层、层序地层和碳、氧同位素变化曲线

1—冰碛岩; 2—泥岩; 3—炭质泥岩; 4—灰岩; 5—白云质灰岩; 6—灰质白云岩; 7—白云岩; 8—泥质白云岩; 9—含炭质白云岩; 10—含硅质白云岩; 11—含砾屑白云岩; 12—角砾白云岩; 13—含硅磷质白云岩; 14—鲕白云岩; 15—含内碎屑白云岩; 16—硅质岩; 17—硅质条带; 18—掩盖; 19— $\delta^{18}\text{O}$ 点; 20— $\delta^{13}\text{C}$ 点; SN—碳同位素负偏离; B(L, M, U, T)DSS—陡山沱组底(下、中、上、顶)部层序; CAP—盖帽白云岩; TST—海侵域; HST—高位域

Fig.2 Litho- and sequence stratigraphy, and $\delta^{13}\text{C}$ (‰, PDB) and $\delta^{18}\text{O}$ (‰, PDB) profiles of the Doushantuo Formation in Sixi, Zigui
 1—Tillite; 2—Mudstone; 3—Carbonaceous mudstone; 4—Limestone; 5—Dolomite limestone; 6—Calcite dolomite; 7—Dolomite; 8—Argillaceous dolomite; 9—Carbonic dolomite; 10—Siliceous dolomite; 11—Dolomite with gravel; 12—Brecciated dolomite; 13—Siliceous phosphorus dolomite; 14—Oolitic limestone; 15—Intraclast-bearing dolomite; 16—Chert; 17—Silicious band; 18—Cover; 19— $\delta^{18}\text{O}$ point; 20— $\delta^{13}\text{C}$ point; SN—Carbonate isotope excursion; B(L, M, U, T) DSS—Third-order sequence in the basal (lower, middle, upper, top) part of the Doushantuo Formation; CAP—Cap dolomite; TST—Transgressive systems track; HST—Highstand systems track

类型,不同学者看法不一^[6]。本次以晓峰河陡山沱组剖面为基础,对该区的陡山沱组剖面进行了重新实测,并在陡山沱组二段中部,陡山沱组三段和四段底部分别发现1层代表海侵的灰岩或白云质灰岩(图3)。

晓峰剖面沿晓峰河河谷南侧出露,但剖面陡山沱组第一段和第二段中上部地层出露较差,碳同位素地层样品的测试和研究主要集中在陡山沱组二段中下部以及陡山沱组第三段至第四段地层中(图3,表2)。共采集和测试碳、氧同位素样品109件,结果显示陡山沱组二段下部地层的碳同位素组成相对稳定,40个样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为6.03‰,最大值为7.2‰,最小值为4.68‰。但在距陡山沱组二段中部灰岩出现约25m处的中层状白云岩中发生 $\delta^{13}\text{C}$ 的突然下降, $\delta^{13}\text{C}$ 从之前的5.34‰突然下降到-2.11‰,但此后又迅速上升到2.03‰,并逐渐震荡升高,并在灰岩层中部达到其最大值7.48‰。陡山沱组二段上部岩性与标准的陡山沱组一样,以粉砂质泥岩为主。从陡山沱组二段顶部5个样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 从5.05‰依次递减到最小值-2.47‰推测陡山沱组二段顶部发生与泗溪陡山沱组二段顶部一样的碳同位素负偏离。但从所揭示的碳酸盐样品的碳同位素负异常的次数和组成上看,此次负偏离可能仅相当于泗溪剖面的SN3碳同位素负偏离。泗溪剖面上的SN4在晓峰河地区可能因海平面下降,并发生陆上暴露而未能保存。

陡山沱组三段底部发生了碳同位素的明显正偏离, $\delta^{13}\text{C}$ 从陡山沱组二段顶部的-2.47‰迅速上升到其最大值6.14‰。宜昌晓峰河地区陡山沱组三段中部相变为灰岩与泥岩互层地层,该段地层中灰岩的碳同位素组成与陡山沱组第三段下部白云质灰岩的碳同位素组成相似, $\delta^{13}\text{C}$ 为4‰左右,但泥岩层中所夹的灰岩透镜体的 $\delta^{13}\text{C}$ 具有弱的碳同位素负偏离,为-0.3‰左右。陡山沱组三段上部地层中,除个别白云岩样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 为-3.17外,绝大部分钙质白云岩、灰岩中的 $\delta^{13}\text{C}$ 在0‰附近震荡,较下部页岩层中所夹瘤状灰岩略有升高。陡山沱组三段上述碳同位素组成特点与泗溪剖面同期地层(SN5)中碳同位素组成相似,彼此可以对比。

晓峰河陡山沱组第四段碳同位素组成具有明显正偏离特点。自下而上, $\delta^{13}\text{C}$ 从第四段底部的

0.59‰向上震荡上升,至灯影组底部达到其最高值5.66‰。这在一定程度上暗示开始于陡山沱组三段中部的碳同位素负异常在陡山沱组三段顶部就已经结束。

3.3 秭归青林口陡山沱组剖面

秭归青林口剖面沿秭归茅坪至青林口公路出露,露头良好。与标准的陡山沱组相比,该剖面陡山沱组第一段白云岩和第四段黑色炭质硅质岩明显变厚,其中,相当于花鸡坡—黄牛岩一带盖帽白云岩C3层的厚度增至22.5m,并形成一个由底部深灰色泥晶白云岩、泥岩,中部黑色页岩,上部灰—深灰色中层状含砾砂屑灰岩、灰岩、白云岩和顶部叠层石礁组成的独立层序(陡山沱组底部层序,简称BDSS)(图4)。陡山沱组二段主要由下部黑色炭质泥页岩夹白云岩,上部中层状白云岩夹(互)黑色炭质泥岩,顶部厚层状白云岩夹薄层黑色炭质页岩、层状硅质岩或硅质结核组成,厚85m。陡山沱组第三段虽以厚层状白云岩发育为特点,但中—下部近38m的地层中或多或少地均夹有厚度不等的黑色炭质页岩、层状硅质岩或硅质结核,上部约20m灰色、灰白色中层状泥晶白云岩与下伏地层的接触界面波状起伏,岩石的成层性较差,中部白云岩揉皱变形和角砾化特征明显。

本次研究在秭归青林口陡山沱组共采集碳酸盐岩碳、氧同位素样品112件(表3,图4)。结果显示,陡山沱组一段碳同位素组成与秭归泗溪、宜昌黄牛岩一样,底部 $\delta^{13}\text{C}$ 具有强烈负异常特征,向上逐步震荡升高,至陡山沱组一段顶部达到其最大值1.94‰。但值得注意的是,部分具有强烈碳同位素负异常的样品,包括该段最底部的4个样品(13QLK-0T~2T),中部含砾(坠石?)白云岩(13QLK-7T)以及上部泥质白云岩(13QLK-18T)和白云岩所夹瘤状灰岩(13QLK-20T)样品中氧同位素组成也出现明显的负异常($\delta^{13}\text{C}$ 一般小于-5‰,样品13QLK-20T的 $\delta^{13}\text{C}$ 达到-12‰),只是这些样品中的 $\delta^{18}\text{O}$ 均接近或小于-10‰。它们究竟与后期成岩作用相关,还是冰水活动所致值得今后注意。

与秭归泗溪剖面一样,秭归青林口陡山沱组二段下部、中部和上部同样存在3次规模不等的碳同位素负偏离现象(SN2, SN3, SN4)。第三段碳同位素组成及其变化特点也与秭归泗溪、宜昌黄牛岩剖

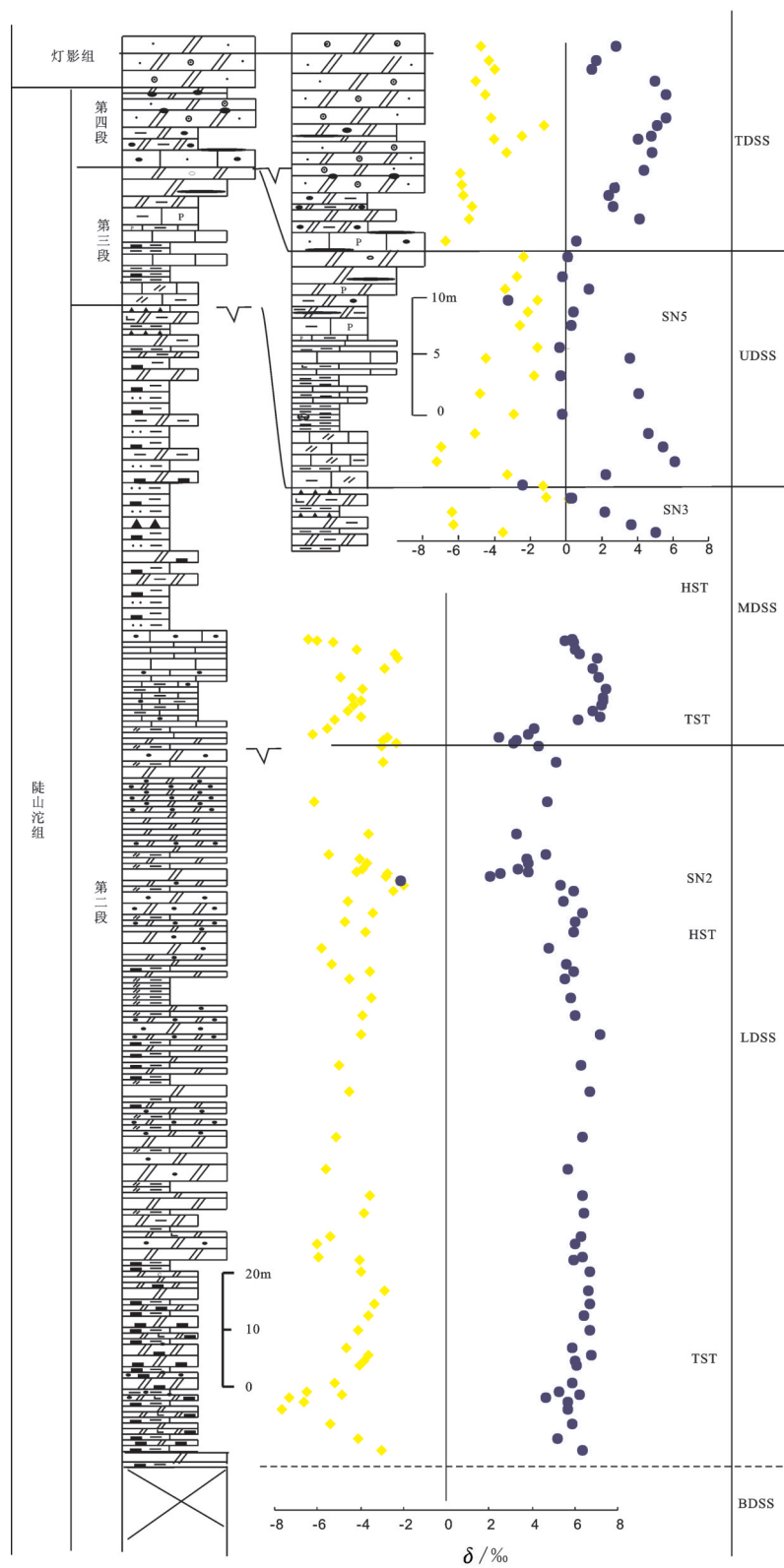


图3 宜昌晓峰河陡山沱组岩石地层、层序地层和碳、氧同位素变化曲线(图例同图2)

Fig.3 Litho- and sequence stratigraphy, and $\delta^{13}\text{C}_{\text{-VPDB}}$ (‰) and $\delta^{18}\text{O}_{\text{-VPDB}}$ (‰) profiles of the Doushantuo Formation along the Xiaofeng River, Yichang (legends as for Fig. 2)

表2 宜昌晓峰河剖面的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$
 Table 2 $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of samples from the Xiaofeng section, Yichang

样品号	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	样品号	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	样品号	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$
Z1d2-2-1T	6.35	-2.99	Z1d2-42-1T	6.34	-3.39	YXDZ-2T	3.67	-6.38
Z1d2-3-1T	5.17	-4.10	Z1d2-43-1T	5.50	-4.57	YXDZ-3T	2.18	-6.46
Z1d2-3-2T	5.87	-5.37	Z1d2-44-1T	5.98	-2.49	YXDZ-4T	0.35	-1.29
Z1d2-4-1T	5.69	-7.64	Z1d2-45-1T	5.34	-2.00	YXDZ-5T	-2.47	-1.14
Z1d2-5-1T	5.67	-6.61	Z1d2-46-1T	-2.11	-2.17	YXDZ-6T	2.25	-3.28
Z1d2-6-1T	4.68	-7.30	Z1d2-47-1T	2.03	-2.82	YXDZ-7T	6.14	-7.29
Z1d2-7-1T	6.25	-4.88	Z1d2-48-1T	2.53	-2.75	YXDZ-8T	5.54	-7.04
Z1d2-8-1T	5.26	-6.48	Z1d2-49-1T	3.83	-4.18	YXDZ-9T	4.71	-5.10
Z1d2-9-1T	5.85	-5.20	Z1d2-50-1T	3.37	-3.89	YXDZ2-10T	-0.24	-2.97
Z1d2-12-1T	6.11	-4.06	Z1d2-51-1T	3.82	-3.68	YXDZ3-11T	4.07	-4.83
Z1d2-13-1T	6.04	-3.82	Z1d2-52-1T	3.77	-4.04	YXDZ4-12T	-0.39	-1.90
Z1d2-14-1T	6.74	-3.65	Z1d2-53-1T	4.66	-5.45	YXDZ5-13T	3.57	-4.53
Z1d2-15-1T	5.91	-4.63	Z1d2-55-1T	3.28	-3.60	YXDZ-14T	-0.27	-1.54
Z1d2-16-1T	6.70	-4.11	Z1d2-56-1T	4.69	-6.18	YXDZ7-15T	0.38	-2.55
Z1d2-17-1T	6.44	-3.65	Z1d2-57-1T	5.12	-2.91	YXDZ8-16T	0.48	-2.09
Z1d2-18-1T	6.69	-3.36	Z1d2-58-1T	4.29	-2.98	YXDZ9-17T	-3.17	-1.57
Z1d2-19-1T	6.61	-2.88	Z1d2-59-1T	3.17	-2.33	YXDZ-18T	1.34	-3.34
Z1d2-20-1T	6.67	-3.94	Z1d2-60-1T	3.31	-2.97	YXDZ-19T	-0.12	-2.69
Z1d2-21-1T	5.95	-4.06	Z1d2-61-1T	2.45	-2.71	YXDZ12-20T	0.22	-2.31
Z1d2-22-1T	6.33	-5.95	Z1d2-62-1T	3.82	-6.19	YXDZ13-21T	0.59	-6.72
Z1d2-23-1T	5.99	-6.02	Z1d2-63-1T	4.12	-5.54	YXDZ15-22T	4.16	-5.47
Z1d2-24-1T	6.29	-5.39	Z1d2-64-1T	6.15	-5.19	YXDZ-23T	2.67	-5.29
Z1d2-25-1T	6.44	-3.85	Z1d2-64-2T	7.15	-3.97	YXDZ15-24T	2.42	-5.73
Z1d2-26-1T	6.34	-3.57	Z1d2-65-1T	6.84	-4.60	YXDZ-25T	2.81	-5.90
Z1d2-27-1T	5.66	-5.61	Z1d2-65-2T	7.23	-4.34	YXDZ17-26T	4.46	-5.87
Z1d2-28-1T	6.37	-5.14	Z1d2-66-1T	7.34	-3.99	YXDZ-27T	4.89	-3.38
Z1d2-29-1T	6.68	-4.53	Z1d2-66-2T	7.34	-4.35	YXDZ19-28T	4.13	-4.03
Z1d2-30-1T	6.32	-5.00	Z1d2-67-1T	7.48	-3.93	YXDZ-29T	4.86	-2.42
Z1d2-32-1T	7.20	-3.99	Z1d2-68-1T	7.13	-4.90	YXDZ-30T	5.16	-1.19
Z1d2-34-1T	6.04	-3.92	Z1d2-69-1T	6.85	-2.84	YXDZ20-31T	5.66	-4.19
Z1d2-35-1T	5.83	-3.52	Z1d2-70-1T	7.07	-2.24	YXDZ-32T	5.56	-4.59
Z1d2-36-1T	5.54	-4.54	Z1d2-71-1T	6.20	-2.42	YXDZ-33T	5.00	-5.09
Z1d2-37-1T	5.98	-3.54	Z1d2-71-2T	6.02	-4.17	YXDZ21-34T	1.43	-4.06
Z1d2-38-1T	5.59	-5.36	Z1d2-72-1T	5.95	-5.25	YXDZ-35T	1.70	-4.33
Z1d2-39-1T	4.79	-5.82	Z1d2-73-1T	5.55	-6.04	YXDZ-36T	2.75	-4.88
Z1d2-40-1T	5.93	-3.73	Z1d2-73-2T	5.85	-6.46			
Z1d2-41-1T	6.02	-4.70	YXDZ-1T	5.06	-3.54			

面同期地层相似,除在陡山沱组二段与三段界线附近发生 $\delta^{13}\text{C}$ 轻微震荡之外,陡山沱组三段下部中厚层白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 中稳定分布在3‰~4‰,直到上部

中-薄层白云岩的出现, $\delta^{13}\text{C}$ 才逐步下降至0‰附近。此后虽然 $\delta^{13}\text{C}$ 的进一步下降至最小-2.77‰,出现了与黄牛岩陡山沱组三段上部相似碳同位素负

表3 秣归青林口剖面样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$
 Table 3 $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of samples from the Qinglinkou section, Zigui

样品号	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	样品号	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	样品号	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$
13QLK-0T	-5.55	-14.89	1305QL-14T	4.09	-5.74	YZQZ-20T	3.28	-7.96
13QLK-0-1T	-5.29	-15.01	1305QL-15T	4.22	-6.39	YZQZ-21T	3.77	-6.44
13QLK-1T	-5.78	-15.31	1305QL-16T	3.21	-4.63	YZQZ-22T	3.91	-2.17
13QLK-2T	-6.22	-15.15	1305QL-17T	3.16	-4.75	YZQZ-23T	4.02	-6.92
13QLK-3T	-3.85	-8.65	1305QL-18T	3.04	-4.83	YZQZ-24T	3.25	-5.2
13QLK-4T	-3.79	-9.55	1305QL-19T	4.14	-4.64	YZQZ-25T	3.79	-3.6
13QLK-5T	-3.61	-8.85	1305QL-20T	2.18	-4.65	YZQZ-26T	3.76	-4.1
13QLK-6T	-3.75	-8.28	1305QL-21T	2.19	-4.55	YZQZ-27T	3.96	-3.35
13QLK-7T	-3.89	-11.29	1305QL-22T	-0.19	-2.8	YZQZ-28T	3.35	-3.14
13QLK-8T	-4.03	-9.33	ZQZD-10T	-2.91	-2.39	YZQZ-29T	2.93	-2.9
13QLK-9T	-4.33	-7.65	ZQZD-9T	-2.92	-2.52	YZQZ-30T	2.91	-3.21
13QLK-10T	-4.05	-5.56	ZQZD-8T	1.86	-4.01	YZQZ-31T	1.73	-4.27
13QLK-12T	-4.95	-14.18	ZQZD-7T	0.71	-2.27	YZQZ-32T	0.11	-4.52
13QLK-13T	-3.74	-8.38	ZQZD-6T	1.04	-4.57	YZQZ-33T	1.24	-5.04
13QLK-14T	-2.85	-9.23	ZQZD-5T	1.88	-2.31	YZQZ-34T	0.25	-5.54
13QLK-15T	-5.35	-7.97	ZQZD-4T	1.2	-1.81	YZQZ-35T	0.73	-5.41
13QLK-16T	-0.45	-8.22	ZQZD-3T	3.13	-2.8	YZQZ-36T	-0.69	-5.6
13QLK-16-2T	-1.39	-8.14	ZQZD-2T	3.01	-2.23	YZQZ-37T	0.17	-3.04
13QLK-17T	-0.36	-7.69	ZQZD-1T	2.33	-2.26	YZQZ-38T	-1.56	-4.57
13QLK-18T	-6.62	-9.99	YZQZ-1T	-2.93	-2.15	YZQZ-39T	-0.78	-3.19
13QLK-19T	0.87	-4.38	YZQZ-2T	-2.38	-2.51	YZQZ-40T	-1.7	-3.91
13QLK-20T	-12.13	-10.16	YZQZ-3T	-2.54	-2.31	YZQZ-41T	-1.71	-3.95
13QLK-21T	1.01	-3.33	YZQZ-4T	0.98	-3.15	YZQZ-42T	-2.16	-2.56
13QLK-22-1T	1.47	-3.39	YZQZ-5T	1.35	-3.37	YZQZ-43T	-2.64	-2.05
13QLK-22-2T	1.94	-2.18	YZQZ-6T	2.61	-4	YZQZ-44T	-2.71	-2.32
1305QL-1T	-1.25	-9.32	YZQZ-7T	3.48	-3.59	YZQZ-45T	-2.6	-2.79
1305QL-2T	-4.55	-5.97	YZQZ-8T	3.3	-2.89	YZQZ-46T	-2.77	-2.36
1305QL-3T	2.04	-6.05	YZQZ-9T	4.91	-4.08	YZQZ-47T	-2.77	-1.97
1305QL-4T	2.2	-5.41	YZQZ-10T	2.44	-3.87	YZQZ-48T	-1.74	-2.99
1305QL-5T	2.28	-4.83	YZQZ-11T	3.61	-4.41	YZQZ-49T	-1.63	-4.41
1305QL-6T	2.53	-5.47	YZQZ-12T	3.37	-3.13	YZQZ-50T	-1.17	-2.51
1305QL-7T	3.52	-5.4	YZQZ-13T	3.31	-2.79	YZQZ-51T	-1.2	-2.24
1305QL-8T	4.23	-5.15	YZQZ-14T	3.86	-2.79	YZQZ-52T	-1.04	-3.25
1305QL-9T	3.06	-7.22	YZQZ-15T	3.18	-2.78	YZQZ-53T	-0.93	-2.19
1305QL-10T	0.69	-3.4	YZQZ-16T	0.19	-3.39	YZQZ-54T	-0.35	-2.4
1305QL-11T	3.05	-7.23	YZQZ-17T	3.01	-5.85	YZQZ-55T	-0.54	-3.76
1305QL-12T	3.07	-6.75	YZQZ-18T	5.78	-7.41			
1305QL-13T	3.41	-6.48	YZQZ-19T	3.99	-6.43			

异常现象。但由于该处 $\delta^{13}\text{C}$ 的负偏离程度与地层中白云岩的揉皱变形和角砾化程度相关,因此,该 $\delta^{13}\text{C}$ 负异常现象是否反映当时海水碳同位素组成情况尚有待于今后进一步研究。

4 碳同位素地层的划分与对比

4.1 碳同位素地层的划分

在埃迪卡拉系年代地层系统完全建立之前,基于海平面升降变化而识别的层序界面无疑为不同相区地层同位素组成变化对比提供了一个重要的时间参考界面。尽管目前在峡东埃迪卡拉系陡山沱组中尚未发现令人满意的,用以指示当时因海平面下降,陆上暴露而形成的古喀斯特面,但在以白云岩和泥质碎屑岩沉积为主的环境中,灰岩的出现或局部黑色炭质页岩层的加厚无疑应与当时海平面的上升有关。据此,笔者在峡东地区上述不同古地理部位的埃迪卡拉系陡山沱组中识别出5次明显的海平面上升事件,划分出5个可以在不同相区进行对比的沉积层序(图2~4)。自下而上,他们分别是分布在陡山沱组一段的陡山沱组底部层序(BDSS),分布陡山沱组二段下部和上部以及陡山沱组第三段的陡山沱组下、中和上部层序(LDSS, MDSS, UDSS)以及由陡山沱组第四段和灯影组蛤蟆井段组成的陡山沱组顶部层序(TDSS)。以层序界面为对比标志,宜昌晓峰和秭归青林口、泗溪陡山沱组碳同位素组成变化的对比结果显示峡东陡山沱组内部可以大致识别出5次可以进行区域对比的碳同位素负异常或变化旋回(自下而上命名为震旦系碳同位素负偏离1, 2, 3, 4和5,简称SN1, SN2, SN3, SN4和SN5)(图5)。现将每一次碳同位素负偏离所在的位置、特征及其与埃迪卡拉系相关生物事件的关系讨论如下。

第1次碳同位素负偏离(SN1)出现在陡山沱组底部盖帽白云岩中(图2、4)。由于该盖帽白云岩中下部所夹火山岩的同位素地质年龄为(635.2±0.5) Ma^[21],与从Namibia北部Otavi地台Ghaub冰碛岩顶部火山岩夹层所获同位素地质年龄(635.5±0.5) Ma^[21, 25]十分接近,因此,峡东埃迪卡拉系底部第一次碳同位素负偏离的形成与Marinoan冰期晚期的气候变化紧密相关。

第2次碳同位素负偏离(SN2)出现在陡山沱组

下部层序(LDSS)的中上部,刺疑源类*Tianzhushania*组合带内部。虽然SN2是此次识别出的5次碳同位素负偏离中时间最短、规模最小的一次碳同位素负偏离,但从在贵州瓮安一带此次碳同位素负偏离之上,MDSS下部地层中,与*Tianzhushania*共生,出现有大量管状或枝状微化石,如*Ramitubus*, *Sinocycloclicus*等^[31, 32],在一定程度上暗示华南的一些浅水地区在此次碳同位素负偏离之后可能发生了多细胞生物细胞形态功能的分异和复杂化以及生物生活方式的多样化事件。按照贵州瓮安上磷矿层下部沉积形成的同位素年龄为(599±4) Ma^[32],推测第2次碳同位素负偏及其所对应的生物事件大约发生在600 Ma。

第3、4次碳同位素负偏离(SN3, SN4)发生在陡山沱组中部层序(MDSS)的中上部。其中第3次碳同位素负偏离N3在以往的研究已有广泛的报道^[4, 5, 7, 8, 12, 14],并曾先后被命名为埃迪卡拉系碳同位素负异常EN2^[5]或BANCE^[14],但SN4在以往的研究中鲜有报道。由于SN3和SN4分别出现在MDSS的早期和晚期高位域沉积中(图2、4、5),且SN3被认为是气候变冷,海平面下降的产物^[12],SN4只出现在水体相对较深的秭归泗溪和青林口一带,而在水体相对较浅的宜昌晓峰河一带代之以层序间断面的出现,相应地层缺失而没有保存SN4记录,因此,SN4很可能是Gaskiers冰期或冰期结束之后,新的海侵来临之前,在陆棚边缘等较深环境中海水留下的碳同位素记录。

第5次碳同位素负偏离(SN5)出现在陡山沱组三段(或UDSS)中上部。这一在峡东地区随海平面上升而出现,并导致 $\delta^{13}\text{C}$ 持续处于相对较低(0‰附近)或强烈负异常状态(<-6‰),曾被命名为DOUNCE的碳同位素负偏离被认为埃迪卡拉中期海洋氧化事件的产物^[7, 11, 33]。但值得注意的是,此次碳同位素负偏离在沉积环境水体相对较深的黄牛岩一带表现出 $\delta^{13}\text{C}$ 的强烈负异常,最小 $\delta^{13}\text{C}$ 达到-9‰^[5, 11, 14]。但在秭归泗溪和晓峰一带浅水台地或台地边缘地区的同期地层中的 $\delta^{13}\text{C}$ 维持在0‰附近,而沉积环境介于上述两者之间,秭归青林口陡山沱组三段的碳同位素组成特征介于上述两者之间。因此,SN5的区域分布特点在一定程度上进一步揭示出当时海洋中海水的碳同位素组成存在明显的

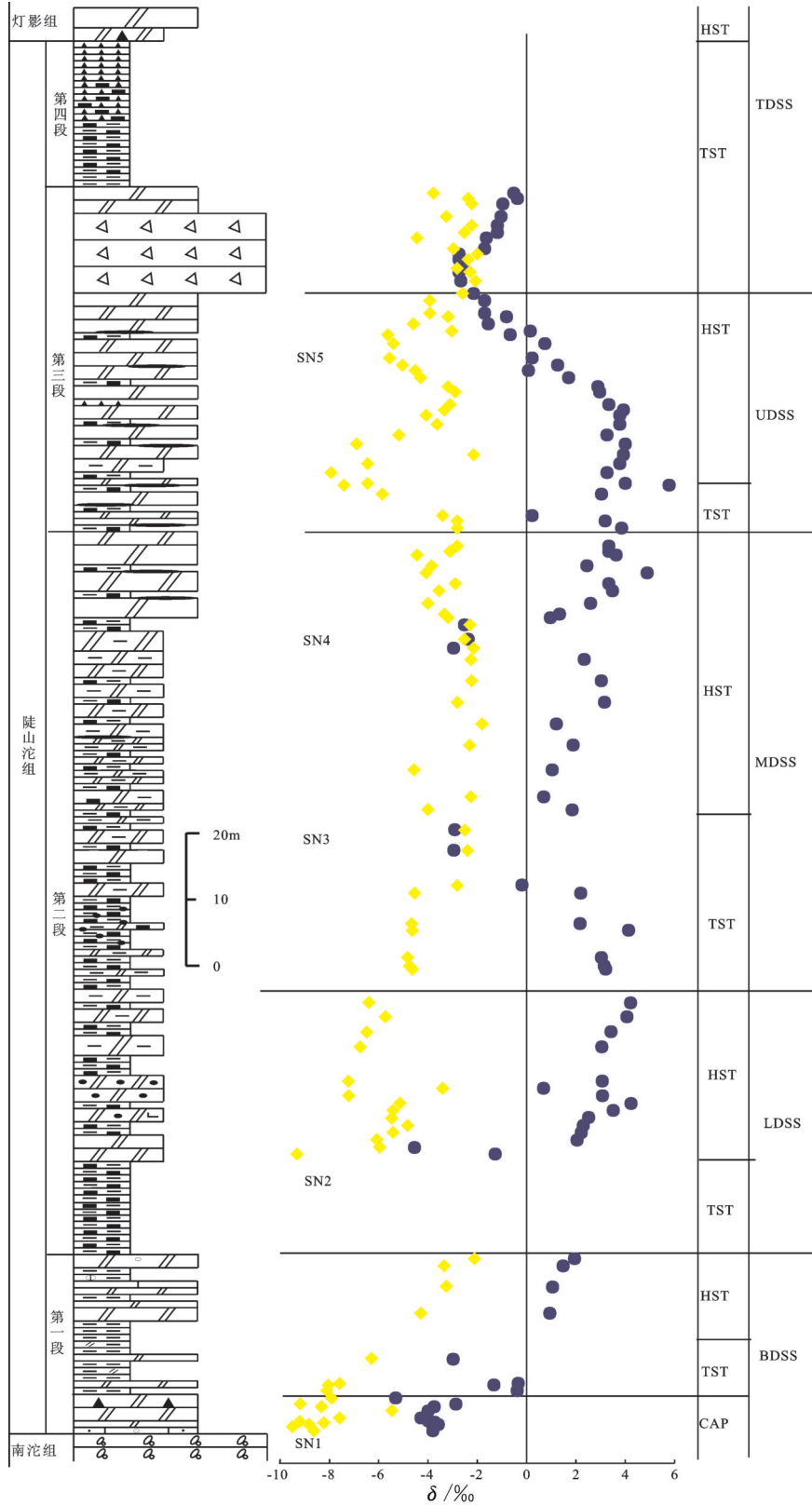


图4 秭归青林口陡山沱组岩石地层、层序地层和碳、氧同位素变化曲线(图例同图2)

Fig.4 Litho- and sequence stratigraphy, and $\delta^{13}\text{C}_{\text{-VPDB}} / \text{‰}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{-VPDB}} / \text{‰}$ profiles of the Doushantuo Formation in Qinglinkou, Zigui (legends as for Fig.2)

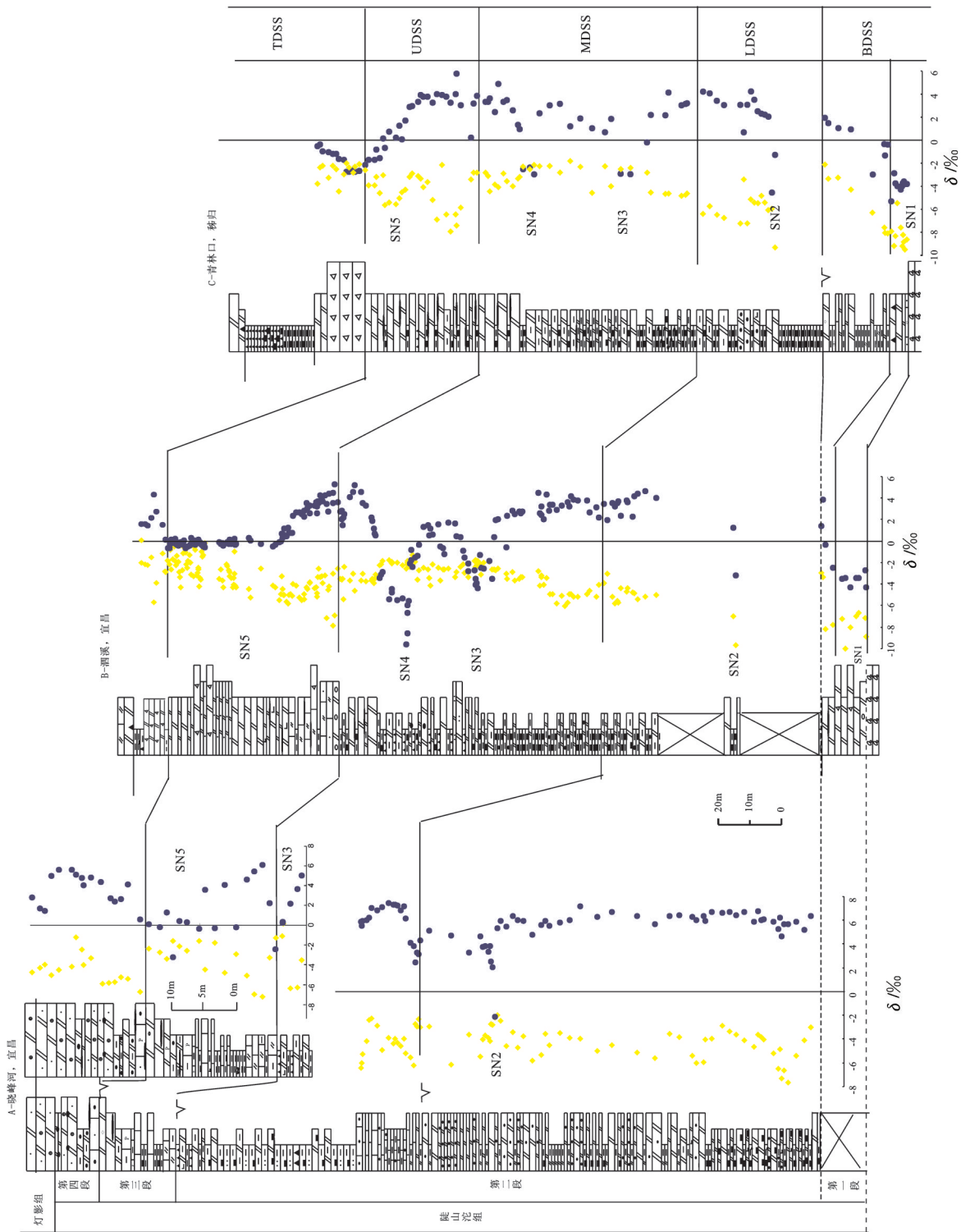


图5 峡东埃迪卡拉系陡山沱组石地层、层序地层和碳同位素地层的划分与对比(图例同图2)
 Fig.5 The divisions and correlations of the litho- and sequence stratigraphy, and $\delta^{13}\text{C}_{\text{-VPDB}}/\text{‰}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{-VPDB}}/\text{‰}$ profiles of the Eidacara Doushantuo Formation in the eastern Yangtze Gorges (legends as for Fig. 2)

分层现象^[5]。

4.2 与国外同期地层碳同位素组成变化的对比

由于峡东埃迪卡拉系底部白云岩内部所夹火山凝灰岩与 Namibia 北部 Otavi 地台 Ghaub 冰碛岩上部所夹火山岩的 U-Pb 锆石年龄接近,因此,峡东地区发育 SN1 碳同位素负偏离的陡山沱组第一段之底与国外 Marinoan 冰碛岩之上的盖帽白云岩,包括澳大利亚南部 Nuccaleena 组,印度北部小喜马拉雅地区 Krol 地台 Blaini 组顶部盖帽白云岩之底, Namibia 北部的 Ghaub 冰碛岩之上 Keilberg 白云岩以及阿曼 Huqf 地区 Ghadir Manqil 冰碛岩之上的 Hadash 白云岩之底可以进行直接对比^[21, 25, 26, 33, 34],同为埃迪卡拉系底界。

在国外上述埃迪卡拉系发育的地区中,印度北部小喜马拉雅地区 Krol 地台的新元古代与扬子地区具有相似的地质演化地史和沉积组合特点^[36],因此,印度北部小喜马拉雅地区 Krol 地台以浅水碳酸盐发育为特征的埃迪卡拉系的碳同位素组成变化和层序地层都能较好地与峡东地区埃迪卡拉系进行直接对比。即自下而上峡东埃迪卡拉系的 SN1, SN2 和 SN3 分别与印度北部小喜马拉雅山地区 Krol 地台上 Infra Krol 组下部和上部以及 Krol B 与 Krol C 组之间的碳同位素负偏离(N1, N2 和 N3)大致与对比(图 5)。与峡东浅水地区埃迪卡拉系中缺失 SN4 的记录一样,在印度北部地区相当于峡东埃迪卡拉系 SN4 的沉积记录同样为发育在 Krol C 组与 Krol B 之间的不整合面所取代^[35, 37]。

阿曼 Huqf 地区埃迪卡拉系的碳同位素变化曲线较为连续。从层序和碳同位素组成变化上看,峡东埃迪卡拉系陡山沱组的 SN5 大致与阿曼 Huqf 地区 Shuram 的碳同位素负异常对比,峡东埃迪卡拉系陡山沱组大致与阿曼 Huqf 地区埃迪卡拉系的 Hadash 白云岩及其之上的 Khufai 组, Masirah Bay 组和 Shuram 组相当^[33, 34, 38](图 6)。

南澳大利亚是全球埃迪卡拉系底界界线层型剖面 and 点所在地,因此,不同学者对该地区埃迪卡拉系内部的生物地层、层序地层和碳同位素地层进行过较为详细的研究^[5, 34, 39, 40]。由于峡东陡山沱组三段 *Tanarium conoideum*-*T. anozos* 疑源类组合带内发育有南澳大利亚埃迪卡拉系复杂疑源类组合中的代表性分子中 *C. glaberosum*, *G. pulchrum*, *T.*

irregularis 和 *V. litoschum* 等^[19, 40],而该刺疑源类多样化之后的 Wonoka 组存在有与 Oman 地区 Shuram 组一样的碳同位素负偏离,因此,峡东地区埃迪卡拉系陡山沱组 SN5 应大致与南澳大利亚的 Wonoka 组的碳同位素负偏离对比(图 6)。

4.3 碳同位素组成变化的年代地层意义

基于三峡地区埃迪卡拉系陡山沱组上述不同相区地层之间及其与全球同期地层之间碳同位素记录的对比结果,与重要古气候变化或全球海平面变化相关的碳同位素组成变化具有远距离地层划分对比的重要潜在意义。因此,作为埃迪卡拉期最晚冰期(Gaskiers)在古海洋环境中所留下碳同位素组成变化的证据 SN4 应具有与 Marinoan 冰碛岩之上盖帽白云岩中碳同位素负偏离 SN1 一样的年代地层划分意义。即 SN4 的出现可以作为埃迪卡拉系内部“统”划分中不可忽视的界线标志。

5 结 论

通过对中国长江三峡东部地区埃迪卡拉系不同相区典型剖面碳同位素地层的划分对比研究,本文可以获得以下结论:

(1)峡东埃迪卡拉系陡山沱组以白云岩和泥质、粉砂质页岩为特征,以白云岩地层中灰岩或黑色页岩的出现,以及白云岩夹(互)黑色页岩地层中黑色炭质页岩的发育为海侵标志,可将峡东地区划分为陡山沱组底部、下部、中部、上部和顶部 4 个可以进行区域对比的层序(自下而上分别命名为 BDSS, LDSS, MDSS, UDSS 和 TDSS)。以生物地层为纽带,层序地层界面为对比标志,宜昌晓峰和秭归青林口、泗溪陡山沱组碳同位素组成变化及其与国外同期地层碳同位素组成变化的对比,结果显示峡东这一时期可以大致识别出 5 次可以进行区域,乃至全球对比的碳同位素负异常或变化旋回,他们分别是分布在 BDSS 下部的 SN1, LDSS 上部的 SN2, MDSS 上部的 SN3 和 SN4, 以及分布在 UDSS 上部的 SN5。其中 SN1 和 SN4 碳同位素负偏离最为明显,最小 $\delta^{13}\text{C}$ 分别达到 $-4\text{‰} \sim -5\text{‰}$ 和 $-9\text{‰} \sim -10\text{‰}$, 分别与 Marinoan 冰期上覆盖帽白云岩以及 Gaskier 冰碛沉积层上、下地层中的碳同位素组成特点接近。SN4 是 Gaskier 冰期的产物。

(2)在峡东埃迪卡拉系陡山沱组内部出现的 5 次

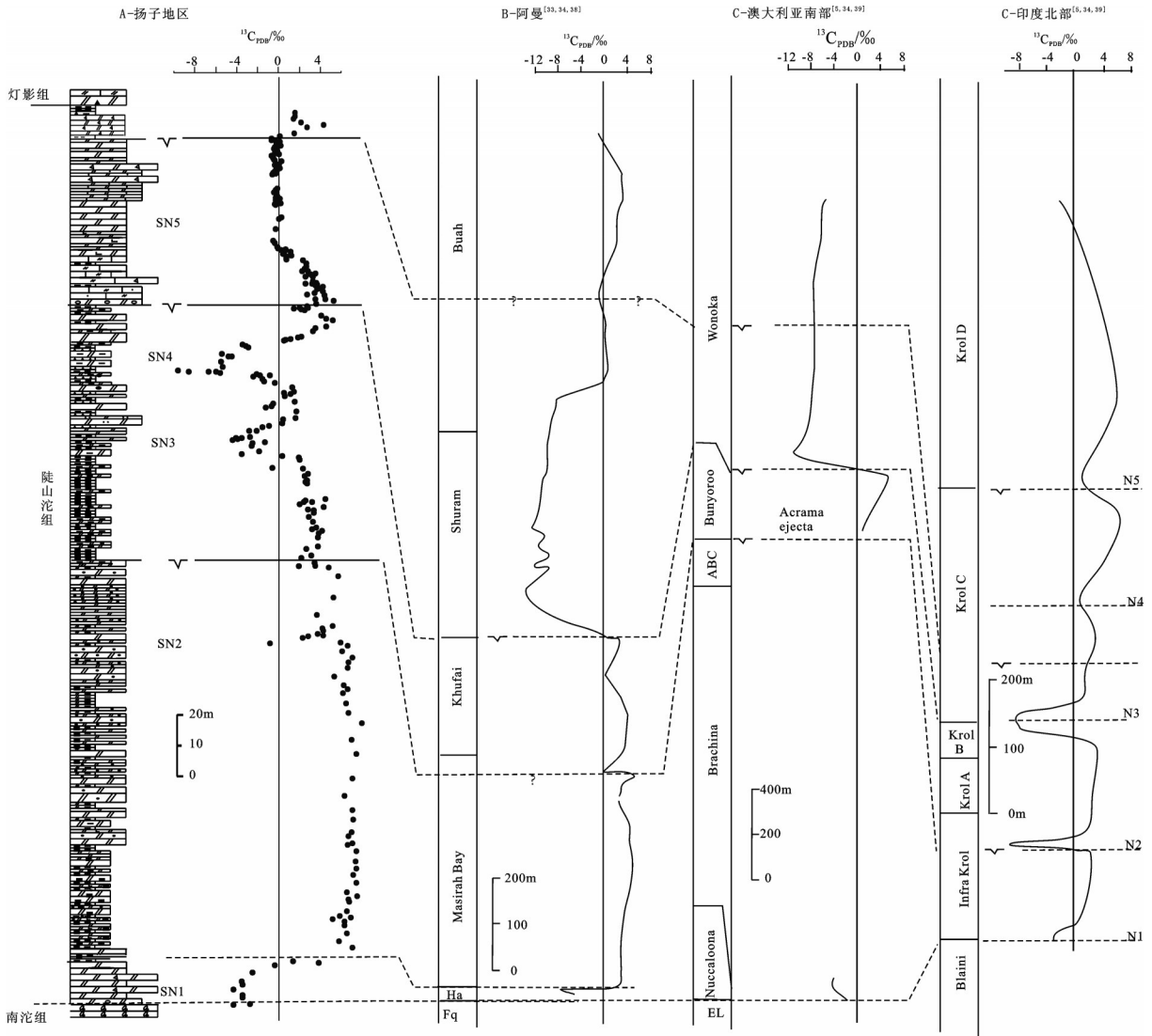


图6 峡东埃迪卡拉系陡山沱组碳同位素组成变化复合曲线及其与国外的对比(图例同图2)

Fig.6 The sequence stratigraphy and composite $\delta^{13}C$ (‰) profiles of the Doushantuo Formation in the eastern Yangtze Gorges and its correlations with contemporary strata in the world (legends as for Fig. 2)

碳同位素负偏离形成的原因各不相同。其中, SN1, SN4 分别与 Marinoan 冰期和 Gaskier 冰期相关。SN2 可能与海平面下降, 碎屑物质增加有关, 但真正的原因尚有待查明。SN3 是气候变冷, 海平面下降的产物。位于陡山沱组上部层序(UDSS)中的 SN5 与海洋氧化相关。由于它与区内持续上升的海平面变化有关, 且碳同位素负偏离在横向上有随海水变深而增强的趋势, 从而进一步指示出当时海水中碳同位素组成具有明显的分层显现。

(3)与全球埃迪卡拉系底界置于 Marino 冰碛岩之上, 发育 SN1 碳同位素强烈负偏离的盖帽白云岩

之底相比较, 作为埃迪卡拉系最晚冰期产物的碳同位素强烈负偏离 SN4 至少具有埃迪卡拉系内部“统”级年代地层单位划分的界线标志意义。

致谢: 审稿专家及责任编辑杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见, 在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

[1] Lee J S, Chao Y T. Geology of the Gorge District of the Yangtze (from Ichang to Tzekuei), with special reference to the development of the Gorges[J]. Bull. Geol. Soc. China, 1924, 3: 351-391.
 [2] Wang Xiaofeng, Erdtemann B D, Chen Xiaohong, et al. Intergreted

- sequence-, bio-, and chemostratigraphy of the Terminal Proterozoic to Lowermost Cambrian "black rock series" from central south China[J]. *Episodes*, 1998, 21(3): 178–189.
- [3] Lambert I B, Walter M R, Zang Wenlong, et al. Palaeoenvironment and carbon isotope stratigraphy of Upper Proterozoic carbonates of the Yangtze platform[J]. *Nature*, 1985, 325: 140–142.
- [4] 陈孝红, 李华芹, 陈立德, 等. 三峡地区震旦系碳酸盐地层碳、氧同位素特征[J]. *地质论评*[J]. 2003, 49(1): 66–73.
Chen Xiaohong, Li Huaqin, Chen Lide, et al. Carbon and oxygen isotope feature of the Sinian carbonate strata in the Three Gorges region[J]. *Geological Review*, 2003, 49(1): 66–73(in Chinese with English abstract).
- [5] Jiang Ganqing, Kaufman A J, Christie–Blick N, et al. Carbon isotope variability across the Ediacaran Yangtze platform in South China: Implications for a large surface to deep ocean $\delta^{13}\text{C}$ gradient[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 261: 303–320.
- [6] Jiang Ganqing, Shi Xiaoying, Zhang Shihong, et al. Stratigraphy and paleogeography of the Ediacaran Doushantuo Formation (ca. 635–551 Ma) in South China[J]. *Gondwana Research*, 2011, 19: 831–849.
- [7] Zhu Maoyan, Zhang Junming, Yang Aihua. Integrated Ediacaran (Sinian) chronostratigraphy of South China[J]. *Palaeogeog., Palaeoclim., Palaeoecol.*, 2007, 254: 7–61.
- [8] Zhu Maoyan, Lu Miao, Zhang Junming, et al. Carbon isotope chemostratigraphy and sedimentary facies evolution of the Ediacaran Doushantuo Formation in western Hubei, South China[J]. *Precambrian Res.*, doi: 10. 1016/j. precamres. 2011. 07. 019
- [9] 尹崇玉, 唐烽, 刘鹏举, 等. 华南埃迪卡拉(震旦系)陡山沱组生物地层学研究的新进展[J]. *地球科学*, 2009, 30(4): 421–432.
Yin Chongyu, Tang Feng, Liu Pengju, et al. New Advances in the study of biostratigraphy of the Sinian (Ediacara) Doushantuo Formation in South China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30(4): 421–432(in Chinese with English abstract).
- [10] 吕苗, 朱茂炎, 赵美娟. 湖北宜昌茅坪泗溪剖面埃迪卡拉系岩石地层和碳同位素地层研究[J]. *地层学杂志*, 2009, 33(4): 359–372.
Lu Miao, Zhu Maoyan and Zhao Meijuan. Litho- and carbon isotope stratigraphy of the Ediacaran System in the Sixi section (Yangtze Gorges), Yichang, Hubei[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2009, 33(4): 359–372 (in Chinese with English abstract).
- [11] Lu Miao, Zhu Maoyan, Zhang Junming, et al. The DOUNCE event at the top of the Ediacaran Doushantuo Formation, South China: Broad stratigraphic occurrence and non-diagenetic origin[J]. *Precambrian Res.*, 2012, doi: 10. 1016/j. precamres. 2011. 10. 018.
- [12] Sawaki Y, Ohno T, Tahata M, et al. The Ediacaran radiogenic Sr isotope excursion in the Doushantuo Formation in the Three Gorges area, South China[J]. *Precambrian Research* 2010, 176: 46–64.
- [13] Zhou Chuanming, Jiang Shaoyong, Xiao Shuhai, et al. Rare earth elements and carbon isotope geochemistry of the Doushantuo Formation in South China: Implication for middle Ediacaran shallow marine redox conditions[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2012, 57: 1998–2006, doi: 10. 1007/s11434-012-5082-6.
- [14] Xiao Shuhai, McFadden K A, Peek S, et al. Integrated chemostratigraphy of the Doushantuo Formation at the northern Xiaofenghe section (Yangtze Gorges, South China) and its implication for Ediacaran stratigraphic correlation and ocean redox models[J]. *Precambrian Res.*, 2012, 192–95: 125–141.
- [15] 陈孟莪, 萧宗正. 峡东上震旦统陡山沱组宏体化石生物群[J]. *古生物学报*, 1992, 31: 513–520.
Chen Menge, Xiao Zhongzheng. Macrofossil biota from Upper Sinian Doushantuo Formation in eastern Yangtze Gorges, China[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1992, 31: 513–520 (in Chinese with English abstract).
- [16] Yin Leiming, Zhu Maoyan, Knoll A H, et al. Doushantuo embryos preserved inside diapause egg cysts[J]. *Nature*, 2007, 446: 661–663.
- [17] McFadden K A, Xiao Shuhai, Zhou Chuanming. Quantitative evaluation of the biostratigraphic distribution of acanthomorphic acritarchs in the Ediacaran Doushantuo Formation in the Yangtze Gorges area, South China[J]. *Precambrian Res.*, 2009, 173: 170–190.
- [18] Liu Pengju, Xiao Shuhai, Yin Chongyu, et al. Silicified tubular microfossils from the upper Doushantuo Formation (Ediacaran) in the Yangtze Gorges area, South China[J]. *J. Paleontol.* 2009, 83: 630–633.
- [19] Liu Pengju, Yin Chongyu, Chen Shouming, et al. The biostratigraphic succession of acanthomorphic acritarchs of the Ediacaran Doushantuo Formation in the Yangtze Gorges area, South China and its biostratigraphic correlation with Australia[J]. *Precambrian Res.*, 2011, doi: 10. 1016/j. precamres. 2011. 07. 009.
- [20] 马国干, 李华芹, 张自超. 华南地区震旦纪时限范围的研究[J]. *中国地质科学院宜昌地质矿产研究所所刊*, 1984, 8: 1–29.
Ma Guogan, Lee Huaqin, Zhang Zichao, 1984, An investigation of the age limits of the Sinian System in South China[J]. *Bull. Yichang Inst. Geolog. Mineral Resources, Chinese Acad. Geol. Sci.*, 8: 1–29 (in Chinese with English abstract).
- [21] Condon D, Zhu Maoyan, Bowring S, et al. U–Pb ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China[J]. *Science*, 2005, 308: 95–98.
- [22] Zhang Shihong, Jiang Gangqing, Zhang J, et al. U–Pb sensitive high-resolution ion microprobe ages from the Doushantuo Formation in south China: Constraints on late Neoproterozoic glaciations[J]. *Geology*, 2005, 33: 473–476.

- [23] 刘鸿允, 沙庆安. 长江峡东区震旦系新见[J]. 地质科学, 1963, (4): 177-187.
Liu Hongyun, Sha Qingan. New sight on the Sinian in eastern Yangtze Gorges area[J]. Scientia Geological Sinica, 1963, (4): 177-187 (in Chinese with English abstract).
- [24] Chen Xiaohong, Zhou Lian, Wei Kai, et al. The environment index of the rare earth elements in conodonts: Evidence from the Ordovician conodonts of the Huanghuachang section, Yichang area. China[J]. Sci. Bull., 2012, 57(4): 349-359.
- [25] Hoffman P F, Halverson G P, Domack E W, et al. Are basal Ediacaran (635 Ma) post-glacial "cap dolostones" diachronous?[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 258: 114-131.
- [26] Halverson G P, Hoffman P F, Schrag D P, et al. Toward a Neoproterozoic composite carbon-isotope record[J]. Geological Society of America Bulletin, 2005, 117, 9-10: 1181-1207; doi: 10.1130/B25630.1.
- [27] Saylor B Y, Kaufman A J, Grotzinger J, et al. A composite reference section for terminal Proterozoic strata of Southern Namibia[J]. Journal of Sedimentary Research, 1998, 68(6): 1223-1235.
- [28] Kaufman A J, Knoll A H, and Narbonne G M. Isotopes, ice ages, and terminal Proterozoic earth history[J]. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., 1997, 94: 6600-6605.
- [29] Kennedy M J. Stratigraphy, Sedimentary and isotopic geochemistry of Australian Neoproterozoic post glacial cap dolostones: Deglaciation $\delta^{13}\text{C}$ excursions, and carbonate precipitation[J]. Journal of Sedimentary Research, 1996, 66(6): 1050-1064.
- [30] Jiang Ganqing, Martin J K, Christie-Blick N. Stable isotopic evidence for methane seeps in Neoproterozoic postglacial cap carbonates[J]. Nature, 2003, 426: 822-826.
- [31] Liu Pengju, Xiao Shuhai, Yin Chongyu, et al. Systematic description and phylogenetic affinity of tubular microfossils from the Ediacaran Doushantuo Formation at Weng'an, south China[J]. Palaeontology, 2008, 51(2): 339-366.
- [32] 刘鹏举, 尹崇玉, 陈寿铭, 等. 华南埃迪卡拉纪陡山沱期管状微体化石分布、生物属性及其地层学意义[J]. 古生物学报, 2010, 49(3): 308-324.
Liu Pengju, Yin Chongyu, Chen Shouming, et al. Affinity, distribution and stratigraphy significance of tubular microfossils from the Ediacaran Doushantuo Formation in South China[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2010, 49 (3): 308-324
- [33] Fike D A, Grotzinger J P, Pratt L M, et al. Oxidation of the Ediacaran Ocean[J]. Nature, 2006, 444: 744-747.
- [34] Le Guerrou'e E, Allen P A, Cozzi A. Chemostratigraphic and sedimentological framework of the largest negative carbon isotopic excursion in Earth history: The Neoproterozoic Shuram Formation (Nafun Group, Oman) [J]. Precambrian Res., 2006, 146: 68-92.
- [35] Kaufman A J, Jiang Ganqing, Christie-Blick N, et al. Stable isotope record of the terminal Neoproterozoic Krol platform in the Lesser Himalayas of northern India[J]. Precambrian Res., 2006, 147: 156-185
- [36] Jiang Ganqing, Soh L E, Christie-Blick N. Neoproterozoic stratigraphic comparison of the Lesser Himalaya (India) and Yangtze block (south China): Paleogeographic implications[J]. Geology, 2003, 31 (10): 917-920.
- [37] Jiang Ganqing, Christie-Blick N, Kaufman A J, et al. Sequence stratigraphy of the Neoproterozoic Infra Krol Formation and Krol Group, Lesser Himalayan, India[J]. Journal of Sedimentary research, 2002, 72(4): 524-542.
- [38] Amthor J E, Grotzinger J P, Schroder S, et al. Extinction of Cloudina and Namacalathus at the Precambrian-Cambrian boundary in Oman[J]. Geol., 2003, 31(5): 431-434.
- [39] Calver C R. Isotope stratigraphy of the Ediacarian (Neoproterozoic III) of the Adelaide Rift Complex, Australia, and the overprint of water column stratification[J]. Precambrian Res., 2000, 100: 121-150.
- [40] Grey K, Walter M R, Calver C R. Neoproterozoic biotic diversification: Snowball Earth or aftermath of the Acraman impact[J]. Geology, 2003, 31(5): 459-462.