

doi:10.19509/j.cnki.dzkq.2020.0207

周鹏,陈孝红,危凯.黄陵背斜东南缘埃迪卡拉系碳稳定同位素组成特征及有机质发育关系讨论[J].地质科技通报,2020,39(2):62-73.

Zhou Peng, Chen Xiaohong, Wei Kai. Carbon isotope characteristics and organic matter development of the Ediacaran in the southeastern margin of the Huangling Anticline, western Hubei[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(2): 62-73.

黄陵背斜东南缘埃迪卡拉系碳稳定同位素组成特征 及有机质发育关系讨论

周 鹏, 陈孝红, 危 凯

(中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205)

摘 要:通过在黄陵背斜东南缘部署实施的一口页岩气调查井(EYD5),获取了埃迪卡拉系碳同位素参数和相关有机碳数据,建立了该区埃迪卡拉系陡山沱组一灯影组蛤蟆井段碳同位素曲线,在陡山沱组识别出4次负漂移,2次正漂移区间,在灯影组蛤蟆井段识别出1次负漂移,1次正漂移区间,并可在区域范围内有效对比。探讨了该区陡山沱组四段至灯影组蛤蟆井段在区域上的对比标志,明确了该区陡山沱组碳同位素异常与有机碳含量无相关性,碳同位素的正、负漂移区间均可发育富有机质层段,持续的 $\delta^{13}\text{C}$ 负值区间对应富有机质页岩层段发育。

关键词:黄陵背斜;埃迪卡拉系;碳同位素;有机质

中图分类号:P597+.2

文章编号:1000-7849(2020)02-0062-12

收稿日期:2019-06-29

Carbon isotope characteristics and organic matter development of the Ediacaran in the southeastern margin of the Huangling anticline, western Hubei

Zhou Peng, Chen Xiaohong, Wei Kai

(Wuhan Center of Geological Survey, CGS, Wuhan 430205, China)

Abstract: The carbon isotope and TOC data of the Ediacaran in the southeastern margin of the Huangling anticline have been obtained by the testing analysis of core samples from the Well EYD5. The carbon isotope curves of the Ediacaran Doushantuo Formation to the Hamajing Member of the Dengying Formation have been established, and 4 negative excursions and 2 positive excursions are recognized, as well as 1 negative excursion and 1 positive excursions interval in the Hamajing Member of the Dengying Formation. This can be compared with the reported curves from regional sections during this period. In this paper, the carbon isotope markers within the Ediacaran Doushantuo Formation to the Hamajing Member of the Dengying Formation for stratigraphic correlation are summarized, and the TOC variation in the Doushantuo Formation has no relationship with carbon isotope anomaly, but the organic-rich shale usually has continuous negative value of $\delta^{13}\text{C}$.

Key words: Huangling anticline; Ediacaran; carbon isotope; organic matter

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“中扬子古生界页岩气基础地质调查”(121201009000150017);中国地质调查局地质调查项目“湘鄂地区页岩气战略选区调查”(DD20190109)

作者简介:周 鹏(1982—),男,高级工程师,主要从事区域地质调查工作。E-mail:zhoupeng_01@126.com

鄂西地区埃迪卡拉系出露广泛,分布稳定。以黄陵背斜为核心的区域,前人针对埃迪卡拉系在岩石地层、生物地层、层序地层、岩相古地理和碳稳定同位素等方面进行了大量卓有成效的研究工作^[1-26]。然而由于埃迪卡拉纪古生物化石产出的局限性、露头出露的程度不同和不同学者对岩石地层划分认识的差异性,导致峡东地区埃迪卡拉系地层划分与对比还存在着一些分歧^[4,27-29]。碳酸盐岩碳稳定同位素综合记录了地史时期海平面、古地理、古气候和古环境变化的信息,是研究地质历史上全球碳循环和生物地球化学循环变化的主要手段,同时也已经广泛应用于各地质时代的地层划分、对比^[30-35],为全球埃迪卡拉系地层对比提供了很好的方式^[6]。另外,生物的产率和有机质的埋藏是影响碳稳定同位素和有机质富集的重要因素^[36-37]。

在有着共同影响因素的情况下,碳稳定同位素变化能否从侧面反映有机碳含量变化,能否为富有机质页岩的发现提供依据?为此,笔者拟通过“中扬子地区古生界页岩气基础地质调查”项目在宜昌黄花乡部署实施的 EYD5 井所获得的碳氧稳定同位素数据,结合有机地球化学、岩石地层、层序地层,为地层划分对比及岩相古地理的精细刻画提供更为详实可靠的科学依据,并探讨碳稳定同位素与有机质发育的对应关系。

1 地质概况

研究区位于黄陵背斜周缘,该区域发育自南华纪以来的沉积地层,埃迪卡拉系地层呈环带状分布在黄陵背斜的周缘,采样剖面 EYD5 井位于黄陵背斜的东南缘(图 1)。

在峡东震旦系标准剖面上,陡山沱组以白云岩、粉砂质泥岩发育为主要特征,从下而上具有明显的四分性特征。陡山沱组一段为盖帽碳酸盐岩,二段以白云岩夹含粉砂质泥岩为主,发育丰富硅磷质结核,三段以浅灰色白云岩为主,四段在西翼、南翼主要为黑色含炭质泥岩、硅质岩,在东翼和北翼主要为碳酸盐岩,几乎不含泥岩^[11,26,38]。在 An 等^[28]对陡山沱组四段一灯影组蛤蟆井段岩石序列提出异议之前,通常认为黄牛岩剖面陡山沱组四段与庙河剖面陡山沱组四段是等时地层单元^[23,25,27,29],尽管学者们一直对能在庙河剖面上发现庙河生物群,而在类似的黄牛岩剖面陡山沱组四段同期沉积地层中却一直没有新的发现而心存疑虑。An 等^[28]在对陡山沱组四段提出新的认识后,相继在黄陵背斜南缘、西缘、北缘陡山沱组剖面发现了庙河生物群。对黄陵背斜东南缘埃迪卡拉系隐伏地层区陡山沱组的研

究,拓展了陡山沱组的研究范围,为进一步明确陡山沱组一灯影组界线附近地层序列提供了新的佐证。

2 地层简述

EYD5 井位于湖北省宜昌市黄花乡黄陵背斜东南缘(图 1)。该钻井剖面陡山沱组为灰黑色白云岩、含燧石结核白云岩和黑色、灰黑色含炭质页岩,与下伏地层南华系南沱组冰碛砾岩呈整合接触;与上覆地层灯影组灰色白云岩呈整合接触。EYD5 井陡山沱组钻井剖面详述如下。

该钻井剖面埃迪卡拉系陡山沱组继承了峡东地区震旦系陡山沱组岩石序列特征,其岩性四分性明显,区域上具有较好的对比性(图 2)。陡山沱组一段为盖帽碳酸盐岩,主要为浅灰色、灰白色泥晶白云岩,夹少量深灰色粉晶白云岩、黑色泥质条带,白云岩中可见砾屑。陡山沱组二段可分为上下两部分,下部为灰黑色泥岩、含白云质泥岩,夹少量深灰色泥晶白云岩、泥晶灰岩,泥岩中发育丰富磷质条带、丰富黄铁矿颗粒;上部主要为深灰色砂屑灰岩、砂屑白云岩,夹少量黑色泥岩,碳酸盐岩中硅磷质结核极发育。陡山沱组三段为灰色砂屑灰岩、灰褐色含泥质白云岩,硅磷质结核不发育。陡山沱组四段为黑色、灰黑色含炭质泥岩、泥岩,夹灰色泥晶白云岩,泥岩中含丰富黄铁矿结核和条带。灯影组蛤蟆井段与下伏陡山沱组以大量出现碳酸盐岩沉积为分界,呈整

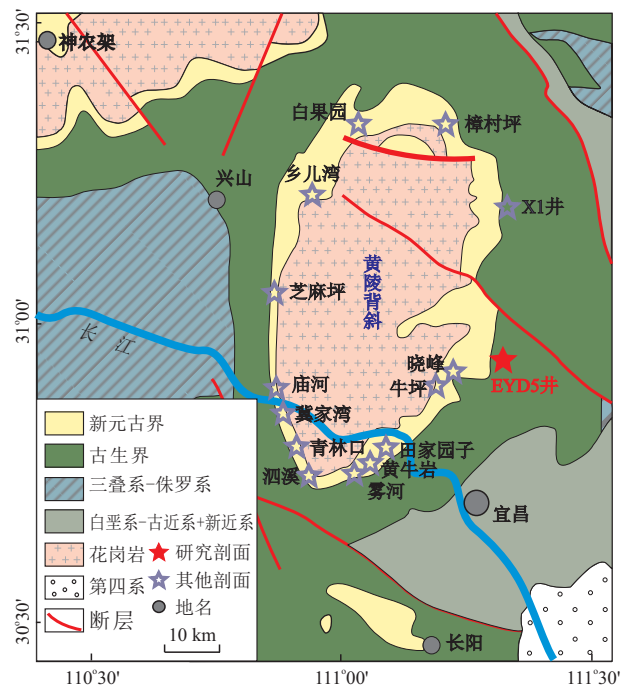
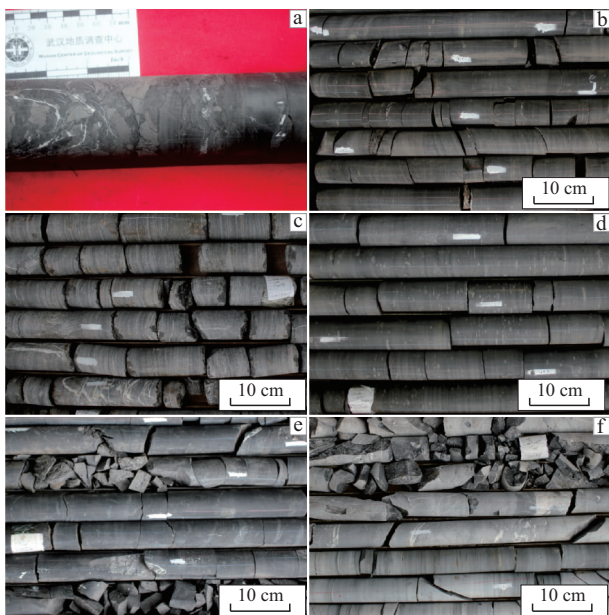


图 1 研究区域地质简图^[11,26,38]

Fig.1 Geological map of the study area showing the location of Well EYD5



a.灯影组蛤蟆井段岩溶角砾岩;b.陡山沱组四段页岩;c.陡山沱组三段砂屑灰岩;d.陡山沱组二段上部含硅磷质结核白云岩;e.陡山沱组二段下部含硅磷质条带页岩;f.陡山沱组一段盖帽白云岩

图2 EYD5井陡山沱组—灯影组蛤蟆井段典型岩性特征
Fig.2 Typical lithologic photos from the Doushantuo Formation to the Hamajing Member of the Dengying Formation in the Well EYD5

合接触关系。蛤蟆井段中部暴露面之下岩性为下部灰黑色泥岩,夹灰色泥晶灰岩、泥晶白云岩,泥岩中含丰富黄铁矿结核,其上部为灰褐色泥质白云岩、泥晶白云岩,含较丰富硅磷质结核,顶部发育岩溶角砾岩,角砾成分为砂屑白云岩、泥质白云岩、泥晶白云岩,角砾呈棱角状,分选差。

3 分析及样品可靠性分析

3.1 碳氧同位素测试

本次研究采集的陡山沱组和灯影组样品均为碳酸盐岩,样品的采集密度控制在 1.2 m 左右,关键层位适当加大样品采集密度,共采集碳酸盐岩样品 250 件。所采集的样品均新鲜、无风化、无裂隙。测试在中国地质调查局自然资源部中南矿产资源监督检测中心同位素地球化学研究实验室采用 GasB-HNch II 和质谱 MAT253 联机分析完成:将装有适量样品的 12 mL 样品瓶置于 GasBHNch II 恒温槽中,He 气吹扫完空气后加入 6 滴高纯度磷酸,72℃ 恒温反应至少 4 h 后,将反应生成的 CO₂ 通过载气经 70℃ 的色谱柱分离后进入 MAT253 测定碳和氧同位素组成。分析全过程采用国家和国际标样及重复样(数量为样品总数的 30%)进行质量监控。所用的质谱仪测试精度为 ±0.1‰。使用标准为

GBW-04416(国家一级标准物质, $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}} = 1.61\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}} = -11.59\text{‰} \pm 0.06\text{‰}$)。文中给出的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均以国际标准物质 VPDB 物质为比照标准。

海相碳酸盐岩的碳同位素在沉积后,后期的蚀变作用可能会改变海水的原始同位素组成,因此在使用测试数据之前需要进行原始性检验,以判断其是否受到了沉积后蚀变作用的影响。一般利用一些经验性的指标来确定海相碳酸盐岩沉积物埋藏后同位素组成是否发生了大的变化^[39]。

除了在采样和测试环节严格按照操作规程操作外,还测试了 37 个重复样,以验证数据的可靠性,重复样占总样品数的 15%。从所测数据的相关性看,陡山沱组二段下部分样品氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值小于 -10‰,可能遭受了成岩后蚀变的影响,但从碳氧同位素的分布特征看,其相关性仅为 0.22,相关性低(图 3),说明所测试样品总体上受后期蚀变作用的影响较小。

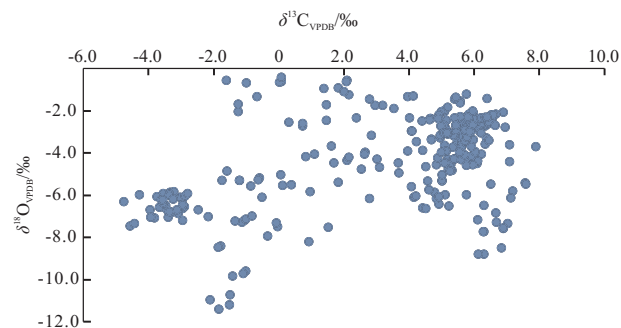


图3 EYD5井埃迪卡拉系陡山沱组—灯影组 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值相关性分析

Fig.3 Cross-plots of $\delta^{13}\text{C}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ from the Doushantuo Formation to the Dengying Formation in the Well EYD5

3.2 有机碳含量测试

本次有机碳含量研究所采集的陡山沱组样品均为泥页岩,对黑色泥页岩段进行了密集采样,共对 45 个样品进行了 $w(\text{TOC})$ 测试分析。

有机碳含量分析是在美国 LECO 公司生产的 CS230 高频红外碳硫分析仪上完成的。具体分析步骤如下:称取 100 mg 左右的样品粉末加入透水坩埚中,加入 5% 盐酸溶液,在电热板 80℃ 条件下加热 6 h 除去碳酸盐,之后用高纯水反复清洗至完全除去残余的盐酸,65℃ 下烘干样品,将已处理好的样品放入 CS230 碳硫分析仪中,加入铁屑、钨粒为助溶剂,以 N₂ 为载气, O₂ 为助燃气,采用高频感应磁场加热红外吸收的方法,根据产生的 CO₂ 峰面积来计算所测样品的有机碳含量。

4 碳稳定同位素分析

4.1 碳氧同位素组成变化特征

测试分析结果显示,碳同位素在 EYD5 井埃迪

卡拉系陡山沱组钻井剖面上的垂向变化存在明显规律性(表 1,图 4)。陡山沱组一段“盖帽碳酸盐岩”中, $\delta^{13}\text{C}$ 值存在明显负偏移,在 1 512.2~1 501.2 m 井段, $\delta^{13}\text{C}$ 值一直稳定在-3.34‰左右,向上存在一

表 1 EYD5 井埃迪卡拉系 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值数据分析结果
Table 1 The $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of the samples in the Ediacaran from the Well EYD5(continues)

样品	井深/m	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	样品	井深/m	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	样品	井深/m	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$
YD5-4H	1 512.2	-3.48	-6.49	YD5-5H	1 511.7	-3.54	-6.57	YD5-5H *	1 511.7	-2.96	-6.17
YD5-6H	1 511.5	-3.03	-6.08	YD5-7H	1 511.2	-2.94	-6.54	YD5-8H	1 510.9	-2.88	-6.04
YD5-9H	1 510.7	-2.81	-5.91	YD5-10H	1 510.3	-2.95	-6.63	YD5-11H *	1 510.1	-2.90	-6.53
YD5-11H	1 510.1	-2.94	-6.55	YD5-12H	1 509.9	-3.09	-6.87	YD5-13H	1 509.5	-2.95	-6.45
YD5-14H	1 509.2	-2.95	-7.20	YD5-16H	1 508.3	-3.40	-7.03	YD5-17H	1 508.1	-3.28	-6.79
YD5-19H	1 507.4	-3.67	-6.55	YD5-23H *	1 506.6	-3.33	-5.85	YD5-23H	1 506.6	-3.30	-5.87
YD5-24H	1 506.2	-3.55	-5.90	YD5-26H	1 505.5	-3.22	-5.96	YD5-28H	1 505.3	-3.23	-5.83
YD5-29H	1 505.0	-3.75	-6.06	YD5-31H	1 504.7	-3.41	-6.72	YD5-33H	1 504.3	-3.13	-6.69
YD5-35H *	1 504.0	-3.36	-5.95	YD5-35H	1 504.0	-3.35	-6.01	YD5-37H	1 503.5	-3.55	-6.36
YD5-39H	1 503.1	-3.35	-6.77	YD5-41H	1 502.7	-3.61	-6.20	YD5-42H	1 502.5	-3.95	-6.68
YD5-43H	1 502. 2	-3.25	-6.19	YD5-45H	1 501.7	-3.82	-7.08	YD5-46H	1 501.4	-3.94	-7.05
YD5-47H	1 501.1	-4.76	-6.30	YD5-49H *	1 500.8	-1.20	-5.29	YD5-49H	1 500.8	-1.21	-5.29
YD5-50H	1 500.6	-2.17	-7.01	YD5-51H	1 500.1	-1.06	-7.20	YD5-52H	1 499.9	-1.13	-7.27
YD5-53H	1 499.4	-1.01	-7.12	YD5-54H	1 499.1	-1.35	-7.23	YD5-55H	1 498.5	-0.82	-6.98
YD5-56H	1 498.0	-1.78	-8.39	YD5-56H *	1 498.0	-1.87	-8.46	YD5-57H	1 497.2	-2.47	-6.67
YD5-58H	1 496.8	-3.57	-6.21	YD5-59H	1 496.4	-1.74	-5.30	YD5-60H	1 495.8	-4.27	-5.98
YD5-61H	1 494.9	-0.52	-6.09	YD5-62H	1 494.6	0.11	-5.53	YD5-63H	1 494.4	-0.04	-7.47
YD5-63H *	1 494.4	-0.08	-7.31	YD5-76H	1 485.3	-1.50	-10.72	YD5-81H	1 481.1	-1.85	-11.40
YD5-84H	1 478.8	-1.42	-9.82	YD5-86H	1 477.4	-1.52	-11.19	YD5-89H	1 475.2	-2.11	-10.96
YD5-91H	1 474.0	-1.02	-9.60	YD5-91H *	1 474.0	-1.09	-9.70	YD5-93H	1 473.1	-0.34	-7.93
YD5-99H	1 470.3	0.83	-4.15	YD5-100H	1 469.6	0.74	-2.71	YD5-100H *	1 469.6	0.74	-2.60
YD5-102H	1 468.8	1.46	-2.45	YD5-103H	1 468.0	0.30	-2.53	YD5-105H	1 466.8	0.05	-5.02
YD5-107H	1 466.0	-0.60	-5.17	YD5-107H *	1 466.0	-0.64	-5.25	YD5-109H	1 465.1	0.39	-5.50
YD5-110H	1 464.1	1.70	-4.46	YD5-112H	1 462.9	2.54	-4.75	YD5-114H	1 461.8	3.09	-4.68
YD5-117H	1 460.1	1.09	-4.06	YD5-119H	1 458.5	3.02	-4.29	YD5-121H	1 457.1	3.96	-3.90
YD5-122H	1 456.0	4.51	-4.63	YD5-125H	1 454.6	4.42	-3.88	YD5-126H	1 453.6	3.66	-4.45
YD5-128H	1 452.5	2.10	-4.33	YD5-128H *	1 452.5	2.16	-4.20	YD5-129H	1 451.6	0.97	-5.82
YD5-130H	1 450.5	4.14	-6.08	YD5-131H	1 450.0	4.84	-4.56	YD5-132H	1 448.8	4.58	-5.31
YD5-133H	1 448.1	5.02	-5.31	YD5-133H *	1 448.1	5.02	-5.29	YD5-134H	1 447.6	5.95	-2.53
YD5-135H	1 446.9	4.96	-3.28	YD5-136H	1 446.0	4.95	-3.17	YD5-137H	1 444.8	5.06	-2.94
YD5-138H	1 444.0	5.46	-3.57	YD5-139H	1 443.3	5.33	-3.71	YD5-140H	1 442.6	5.53	-4.22
YD5-140H *	1 442.6	5.62	-4.13	YD5-141H	1 441.5	5.63	-3.57	YD5-142H	1 440.5	5.25	-4.40
YD5-142H *	1 440.5	5.19	-4.29	YD5-143H	1 439.6	5.02	-5.02	YD5-144H	1 438.5	5.21	-4.77
YD5-145H	1 437.5	5.32	-4.83	YD5-146H	1 436.7	5.28	-4.56	YD5-147H	1 435.6	5.27	-4.86
YD5-148H	1 434.5	5.42	-4.24	YD5-149H	1 433.8	5.30	-4.40	YD5-150H	1 432.9	5.63	-3.67
YD5-151H	1 431.9	5.40	-4.27	YD5-151H *	1 431.9	5.38	-4.29	YD5-152H	1 431.2	6.37	-3.29
YD5-154H	1 429.4	5.62	-3.44	YD5-156H	1 427.9	5.68	-3.04	YD5-157H	1 426.9	5.73	-2.77
YD5-158H	1 425.9	6.17	-2.78	YD5-159H	1 424.9	6.08	-2.45	YD5-161H	1 422.6	5.66	-2.63
YD5-161H *	1 422.6	5.61	-2.63	YD5-162H	1 421.7	5.83	-2.16	YD5-163H	1 420.8	5.98	-2.08
YD5-165H	1 418.9	5.86	-2.33	YD5-167H	1 417.7	6.90	-2.07	YD5-168H	1 416.1	5.77	-2.27
YD5-170H	1 414.3	6.33	-2.70	YD5-171H	1 413.5	6.11	-4.17	YD5-171H *	1 413.5	6.22	-4.05
YD5-172H	1 412.1	5.09	-4.46	YD5-173H	1 411.2	6.09	-4.49	YD5-174H	1 409.7	5.76	-4.29
YD5-175H	1 409.0	6.10	-4.36	YD5-176H	1 407.7	5.98	-3.37	YD5-177H	1 406.1	5.53	-3.21
YD5-179H	1 404.5	6.41	-2.61	YD5-180H	1 403.5	5.72	-3.42	YD5-181H	1 402.1	4.67	-2.37
YD5-181H *	1 402.1	4.64	-2.35	YD5-183H	1 400.1	6.55	-2.43	YD5-184H	1 398.7	5.42	-3.21

续表 1

样品	井深/m	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	样品	井深/m	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	样品	井深/m	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$
YD5-184H*	1 398.7	5.36	-3.16	YD5-185H	1 397.4	6.34	-3.56	YD5-186H	1 396.4	5.96	-4.55
YD5-187H	1 395.8	5.61	-4.14	YD5-187H*	1 395.8	5.60	-4.32	YD5-189H	1 394.2	5.92	-4.14
YD5-190H	1 393.2	6.03	-3.94	YD5-191H	1 391.9	5.70	-4.09	YD5-192H	1 390.1	5.92	-3.70
YD5-193H	1 388.2	6.46	-3.38	YD5-195H	1 387.2	6.19	-2.81	YD5-196H	1 386.3	6.22	-2.58
YD5-197H	1 385.2	6.09	-2.48	YD5-198H	1 383.3	6.38	-2.45	YD5-198H*	1 383.3	6.45	-2.53
YD5-200H	1 381.5	6.67	-2.14	YD5-201H	1 380.2	5.18	-3.11	YD5-202H	1 378.4	6.01	-2.46
YD5-203H	1 376.8	5.83	-2.43	YD5-204H	1 375.5	5.96	-2.68	YD5-205H	1 373.9	6.21	-2.33
YD5-205H*	1 373.9	6.34	-2.30	YD5-206H	1 372.4	6.53	-2.18	YD5-207H	1 371.2	5.71	-2.87
YD5-208H	1 369.9	5.66	-2.42	YD5-209H	1 367.9	5.57	-2.82	YD5-210H	1 366.3	5.60	-2.84
YD5-210H*	1 366.3	5.54	-2.89	YD5-211H	1 364.8	5.46	-2.46	YD5-212H	1 363.7	4.99	-2.48
YD5-213H	1 362.2	5.56	-2.27	YD5-214H	1 360.8	5.15	-2.45	YD5-215H	1 359.2	4.40	-2.49
YD5-216H	1 357.1	5.60	-2.69	YD5-217H	1 355.9	5.09	-2.02	YD5-217H*	1 355.9	5.08	-1.97
YD5-218H	1 354.6	4.63	-2.42	YD5-220H	1 351.4	4.69	-3.34	YD5-221H	1 350.0	5.21	-3.02
YD5-222H	1 348.6	5.12	-2.82	YD5-223H	1 347.5	5.07	-2.69	YD5-224H	1 346.0	4.97	-2.72
YD5-225H	1 344.5	5.58	-2.84	YD5-226H	1 342.9	5.19	-1.83	YD5-227H	1 342.6	5.00	-2.03
YD5-227H*	1 342.6	4.91	-2.19	YD5-228H	1 341.7	5.44	-2.93	YD5-229H	1 340.1	5.78	-3.24
YD5-230H	1 338.7	6.39	-1.41	YD5-231H	1 337.1	5.90	-2.98	YD5-232H	1 335.8	5.73	-2.88
YD5-233H	1 333.8	5.96	-2.00	YD5-234H	1 332.7	5.14	-3.90	YD5-235H	1 331.0	5.59	-3.77
YD5-236H	1 329.8	6.15	-2.93	YD5-236H*	1 329.8	6.21	-3.05	YD5-237H	1 328.2	6.59	-2.18
YD5-238H	1 326.7	5.86	-2.97	YD5-239H	1 324.7	6.40	-2.30	YD5-241H	1 323.1	3.95	-1.31
YD5-242H	1 321.5	2.15	-1.23	YD5-243H	1 320.6	4.92	-6.41	YD5-244H	1 319.7	4.41	-6.59
YD5-245H	1 318.5	6.11	-7.16	YD5-246H	1 317.0	6.67	-6.84	YD5-247H	1 315.2	5.22	-6.51
YD5-248H	1 313.1	6.29	-6.48	YD5-249H	1 310.9	6.69	-7.27	YD5-250H	1 309.9	6.90	-7.58
YD5-251H	1 308.3	6.83	-8.50	YD5-252H	1 306.9	7.03	-7.32	YD5-252H*	1 306.9	6.89	-7.53
YD5-253H	1 305.2	6.29	-8.80	YD5-254H	1 303.6	6.12	-8.78	YD5-255H	1 301.9	6.29	-7.72
YD5-255H*	1 301.9	6.27	-7.71	YD5-256H	1 300.6	6.95	-2.78	YD5-257H	1 299.5	7.08	-3.61
YD5-258H	1 297.6	7.09	-4.39	YD5-259H	1 295.2	5.76	-5.97	YD5-260H	1 293.1	4.78	-5.84
YD5-261H	1 291.4	4.20	-6.02	YD5-262H	1 290.4	3.69	-4.93	YD5-263H	1 289.7	4.07	-2.96
YD5-263H*	1 289.7	4.09	-2.94	YD5-264H	1 289.0	3.19	-1.74	YD5-266H	1 286.9	4.02	-2.32
YD5-267H	1 285.4	2.65	-3.95	YD5-268H	1 283.9	2.39	-2.33	YD5-269H	1 282.3	1.38	-0.94
YD5-271H	1 279.7	0.08	-0.61	YD5-271H*	1 279.7	0.02	-0.65	YD5-273H	1 278.6	-0.99	-0.68
YD5-274H	1 277.0	-1.62	-0.54	YD5-275H	1 275.4	-1.25	-1.69	YD5-277H	1 273.3	-0.67	-1.31
YD5-279H	1 272.2	-1.24	-2.03	YD5-280H	1 271.1	0.08	-0.41	YD5-282H	1 269.6	1.82	-0.91
YD5-283H	1 268.3	2.09	-0.56	YD5-283H*	1 268.3	2.07	-0.61	YD5-284H	1 267.7	2.00	-1.09
YD5-286H	1 266.0	1.46	-1.71	YD5-288H	1 264.4	2.96	-1.74	YD5-290H	1 262.9	3.54	-1.87
YD5-292H	1 261.7	2.79	-1.43	YD5-294H	1 260.2	4.12	-1.29	YD5-296H	1 258.7	4.68	-3.37
YD5-297H	1 257.4	4.22	-3.45	YD5-299H	1 255.7	5.56	-1.52	YD5-299H*	1 255.7	5.56	-1.61
YD5-301H	1 254.6	5.79	-2.31	YD5-302H	1 252.7	5.49	-2.62	YD5-303H	1 251.5	5.40	-1.45
YD5-303H*	1 251.5	5.44	-1.34	YD5-304H	1 249.2	5.55	-3.97	YD5-305H	1 248.2	5.40	-2.32
YD5-306H	1 246.9	5.07	-3.03	YD5-307H	1 246.2	4.90	-2.37	YD5-309H	1 245.1	5.76	-1.21
YD5-310H	1 243.9	5.08	-3.63	YD5-312H	1 242.7	5.43	-2.69	YD5-312H*	1 242.7	5.43	-2.68
YD5-314H	1 241.3	6.50	-5.46	YD5-316H	1 239.6	6.64	-2.68	YD5-317H	1 238.7	7.19	-5.79
YD5-319H	1 236.4	5.12	-3.89	YD5-321H	1 234.5	4.88	-4.23	YD5-322H	1 233.2	4.08	-5.60
YD5-324H	1 232.2	4.99	-3.97	YD5-326H	1 231.1	5.10	-5.97	YD5-328H	1 230.0	4.84	-6.14
YD5-328H*	1 230.0	4.91	-6.05	YD5-330H	1 228.7	4.61	-5.74	YD5-332H	1 227.1	2.78	-6.14
YD5-333H	1 226.2	-0.87	-5.56	YD5-334H	1 225.3	-1.60	-4.85	YD5-336H	1 223.9	4.52	-6.61
YD5-337H	1 222.9	1.62	-3.67	YD5-339H	1 221.7	-4.57	-7.46	YD5-339H*	1 221.7	-4.43	-7.33
YD5-340H	1 221.0	1.51	-7.52	YD5-341H	1 220.0	0.93	-8.20	YD5-342H	1 217.3	1.83	-5.38
YD5-343H	1 213.3	2.63	-4.04	YD5-344H	1 209.6	2.85	-3.16	YD5-345H	1 206.9	5.16	-3.04
YD5-346H	1 205.9	5.77	-4.59	YD5-347H	1 205.0	7.13	-6.11	YD5-348H	1 204.4	7.56	-5.40
YD5-349H	1 204.4	7.58	-5.48	YD5-350H	1 200.1	7.90	-3.69				

注：* 为重复样

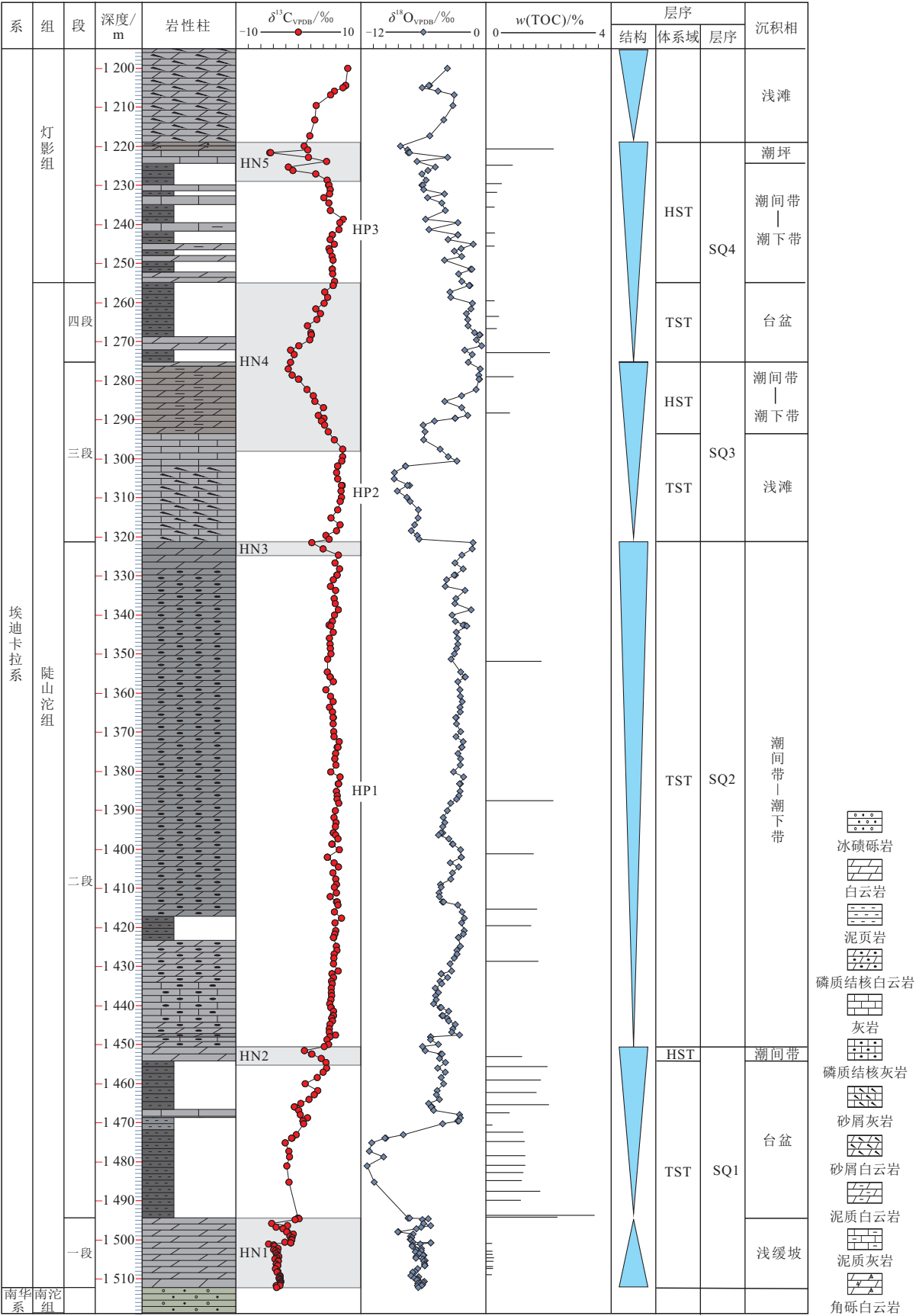


图 4 EYD5 井埃迪卡拉系陡山沱组综合柱状图

Fig.4 Comprehensive column of the Ediacaran Doushantuo Formation in the Well EYD5

个缓慢降低的趋势,在 1 501.1 m 处达到最大负偏值 -4.76% 。在 1 500.8 m 处发生了一次明显的正向偏移,在 1 500.8~1 494.4 m 井段, $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -0.08% ~ -4.27% 之间剧烈波动,总体上,陡山沱组一段存在明显负偏移(HN1)。进入陡山沱组二段,其下部 1 485.3~1 456.0 m 井段,以黑色含炭质泥岩为主,夹深灰色、灰黑色碳酸盐岩, $\delta^{13}\text{C}$ 值存在由 -2.11% 向 4.51% 逐步增大的趋势,期间发生小幅震荡,在 1 456.0~1 451.6 m 井段 $\delta^{13}\text{C}$ 值由 4.51% 迅速降低至 0.97% , $\delta^{13}\text{C}$ 值发生了一次明显的负向偏移(HN2)。陡山沱组中上部 1 450.5~1 324.7 m 井段,岩性以深灰色含砂屑白云岩、含砂屑灰岩为主,发育丰富硅磷质结核, $\delta^{13}\text{C}$ 值存在一个 4.14% ~ 6.90% 之间微弱波动的稳定正向偏移区间(HP1),平均值为 5.62% 。在陡山沱组二段和三段交界处(1 324.7~1 320.6 m 井段)发生了一次短暂的负向偏移,由 6.14% 降低为 2.15% ,偏移幅度达 3.99% ,是一次明显的负向偏移(HN3)。陡山沱组三段以灰色含砂屑白云岩、泥晶灰岩为特征,在其下部 1 318.5~1 297.6 m 井段, $\delta^{13}\text{C}$ 值较稳定,在 5.22% ~ 7.09% 之间轻微波动,平均值为 6.55% 。在陡山沱组三段上部和四段下部 1 297.6~1 255.7 m 井段, $\delta^{13}\text{C}$ 值由 7.09% 向 -1.62% 稳步降低,再逐步升高至 5.56% ,为 EYD5 井陡山沱组中负向偏移持续跨度最大、负向偏移振幅较大的最为明显的一次负向偏移。陡山沱组四段以黑色含炭质泥岩,夹深灰色白云岩、灰岩为特征。在陡山沱组四段上部 1 255.6~1 228.7 m 井段, $\delta^{13}\text{C}$ 值较稳定,在 4.08% ~ 7.19% 之间波动,平均值为 5.39% 。在陡山沱组四段的近顶部 1 228.7~1 219.6 m 井段存在一次负向偏移, $\delta^{13}\text{C}$ 值由 4.61% 向 -4.57% 迅速减小,偏移振幅达 9.18% ,为该剖面上陡山沱组内振幅最大的一次负向偏移。进入灯影组灰色白云岩后, $\delta^{13}\text{C}$ 值由 1.83% 逐步增高至 7.13% ,并稳定在 7.54% 左右。

综上所述,通过对 EYD5 井埃迪卡拉系碳氧稳定同位素测试分析,建立了黄陵背斜东南缘埃迪卡拉系隐伏地层区域的一条完整、详细的陡山沱组碳稳定同位素曲线,在 EYD5 井剖面陡山沱组中识别出 4 次明显的负漂移、2 次明显的正漂移区间,在灯影组蛤蟆井段识别出 1 次明显的负漂移,1 次正漂移区间。上述陡山沱组碳稳定同位素曲线的建立,将埃迪卡拉系的研究范围进一步向黄陵背斜东缘拓展,为区域地层划分对比提供了新的科学依据。

4.2 碳氧同位素对比及异常分析

针对中国华南埃迪卡拉系陡山沱组碳同位素,前人开展了细致系统的研究工作。周传明等^[40]以

贵州瓮安地区剖面为基础,总结了华南地区碳同位素曲线,认为陡山沱组存在 3 次负漂移和 2 次正漂移区间,陡山沱组二段中部存在 1 次疑似负漂移趋势(图 5)。随着华南埃迪卡拉系年代地层、生物地层和碳同位素地层研究的不断深入,Zhu 等^[4]依据扬子台地 12 条剖面,结合层序地层和全球性地质事件,在陡山沱组识别出 3 次碳同位素负漂移,2 次正漂移区间。Zhu 等^[29]后在峡东地区陡山沱组进行研究时,在 WANCE 和 DOUNCE 事件之间发现了 BAINCE 事件,确认峡东陡山沱组存在 4 次负漂移(图 5)。前人资料的积累和陡山沱组碳稳定同位素曲线的不断修正,为华南地区埃迪卡拉系地层划分对比提供了可靠依据。

以前人的华南地区碳稳定同位素曲线^[4]为基础,将 EYD5 井钻井剖面上识别出的埃迪卡拉系陡山沱组碳、氧同位素异常以及 $w(\text{TOC})$ 异常与区域上的各异常进行对比,进一步分析黄陵背斜东缘陡山沱组碳稳定同位素异常的主控因素。因 EYD5 井位于宜昌市黄花乡,故对该井剖面上发现的碳同位素负漂移以 HN 命名,正漂移以 HP 命名,以区分于前人研究。

(1) 负漂移 HN1 出现在陡山沱组盖帽碳酸盐岩中,负漂移稳定在 -3.34% 左右,最大负漂移值 -4.76% ,负漂移特征显著。对于该负漂移,尚未有统一认识,有雪球地球、上升流、甲烷渗漏、淡水分层模式等假说^[43-45]。尽管在 EYD5 井剖面上陡山沱组盖帽碳酸盐岩中未发现如层状平顶晶洞、似帐篷构造、管状构造、重晶石沉积等特征沉积构造,但其显著的负漂移特征仍可作为全球同期范围内的良好对比标志。

HN2 位于紧邻陡山沱组二段中部的一岩性转换面之下,在该处 $\delta^{13}\text{C}$ 值由 4.51% 迅速降低至 0.97% ,存在一偏移值达 3.54% 明显负漂移。针对该处漂移存在两种不同认识,一种观点认为该负漂移位于陡山沱组二段中部的层序界面之下,对应于碳同位素负漂移事件(WANCE)^[3-4,29],是一次区域性事件,在华南区域范围内可以对比,尤其在贵州瓮安剖面和湖北樟村坪剖面上陡山沱组二段中部都存在一暴露间断面^[17,29,46-47],为该负漂移的区域对比提供了佐证。另一观点认为该负漂移应与峡东陡山沱组二段/三段界线对应^[4,40],其对应时间大约在 $(599 \pm 4) \text{ Ma}$ ^[41]。通过对比前人研究^[41],发现与 HN2 对应的岩性转换面,在区域上可以追索对比,可以与贵州瓮安剖面和湖北樟村坪剖面上暴露间面对比,与之相应,HN2 对应于 WANCE 事件^[41],可以作为华南区域陡山沱组对比标志。

HN3 紧邻陡山沱组二段/三段界线之下, $\delta^{13}\text{C}$

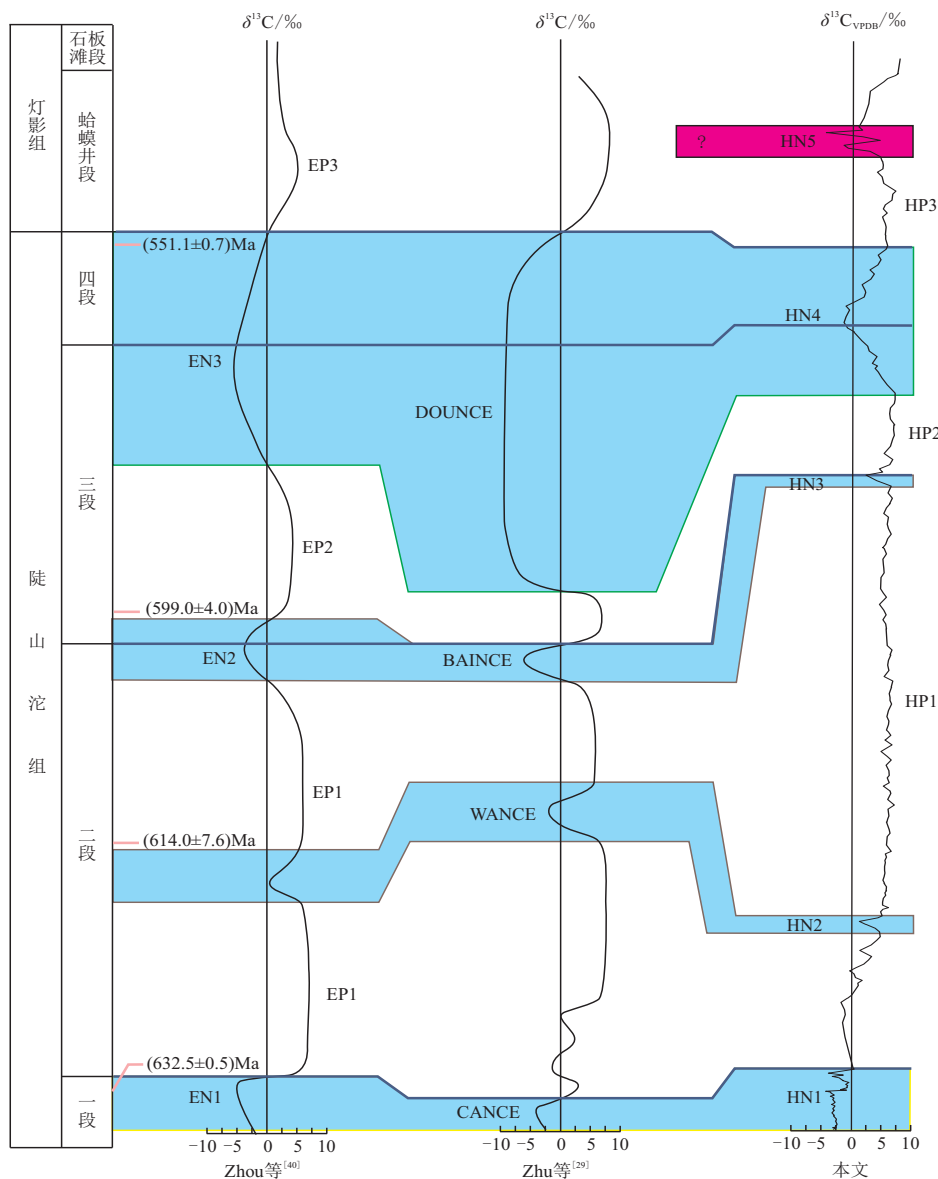
图5 宜昌地区 EYD5 井埃迪卡拉系碳同位素同位素曲线划分及对比^[10,17,29,40-42]

Fig.5 The carbon isotope correlation of the Ediacaran in the Well EYD5, Yichang area, western Hubei

值由 6.14‰ 降低为 2.15‰, 偏移幅度达 3.99‰。Zhu 等^[29]对黄陵背斜周缘 7 条陡山沱组进行了细致深入的碳同位素研究, 识别出了 HN3 负漂移, 并被命名为“BAINCE”事件。而 Zhu 等^[4]和 Zhou 等^[40]可能由于碳同位素采样精度或剖面露头的影响, 未能发现 HN3 负异常。在相对深水沉积环境的泗溪剖面和青林口剖面对此均有强烈的反映。特别是泗溪剖面上 $\delta^{13}\text{C}$ 值可达 -9.59‰, 负漂移幅度可达 10.95‰^[11]。由于 HN3 仅在峡东地区可以识别并进行对比, 在中国南方其他区域缺少对此负漂移的描述, 说明此负漂移可能为一次区域性事件, 且该事件受局部环境影响较大, 其在相对深水区, 负漂移幅度大, 在浅水区负漂移幅度小, 或无法识别。

HN4 发生在陡山沱组三段上部, 该负漂移持续

时间长, 漂移幅度大, 在三段中部到顶部之间, $\delta^{13}\text{C}$ 值由 7.09‰ 逐步降低至 -1.62‰, 漂移幅度达 8.71‰。该负漂移在黄陵背斜周缘黄牛岩剖面(乡党坪剖面)、青林口剖面、田家园子剖面上均特征明显, 可作为良好对比标志^[1,4,11,29,46,48]。Zhu 等^[29]将此次负漂移定义为 DOUNCE 事件, 认为可能是地质历史时期发生的最大一次全球性 $\delta^{13}\text{C}$ 负漂移事件, 与具刺疑源类的绝灭、典型埃迪卡拉纪生物的辐射相对应, 在全球范围内可以广泛识别。该负漂移在澳大利亚的 Wonoka 组、阿曼阿曼南部的 Shuram 组和印度小喜马拉雅山脉的 Krol 群下部均有报道^[6]。

HN5 发生在灯影组蛤蟆井段中部, 对应处为一暴露侵蚀面(图 6)。目前该负漂移并未被系统性总结描述, 但在峡东九龙湾剖面、乡儿湾剖面等多个剖

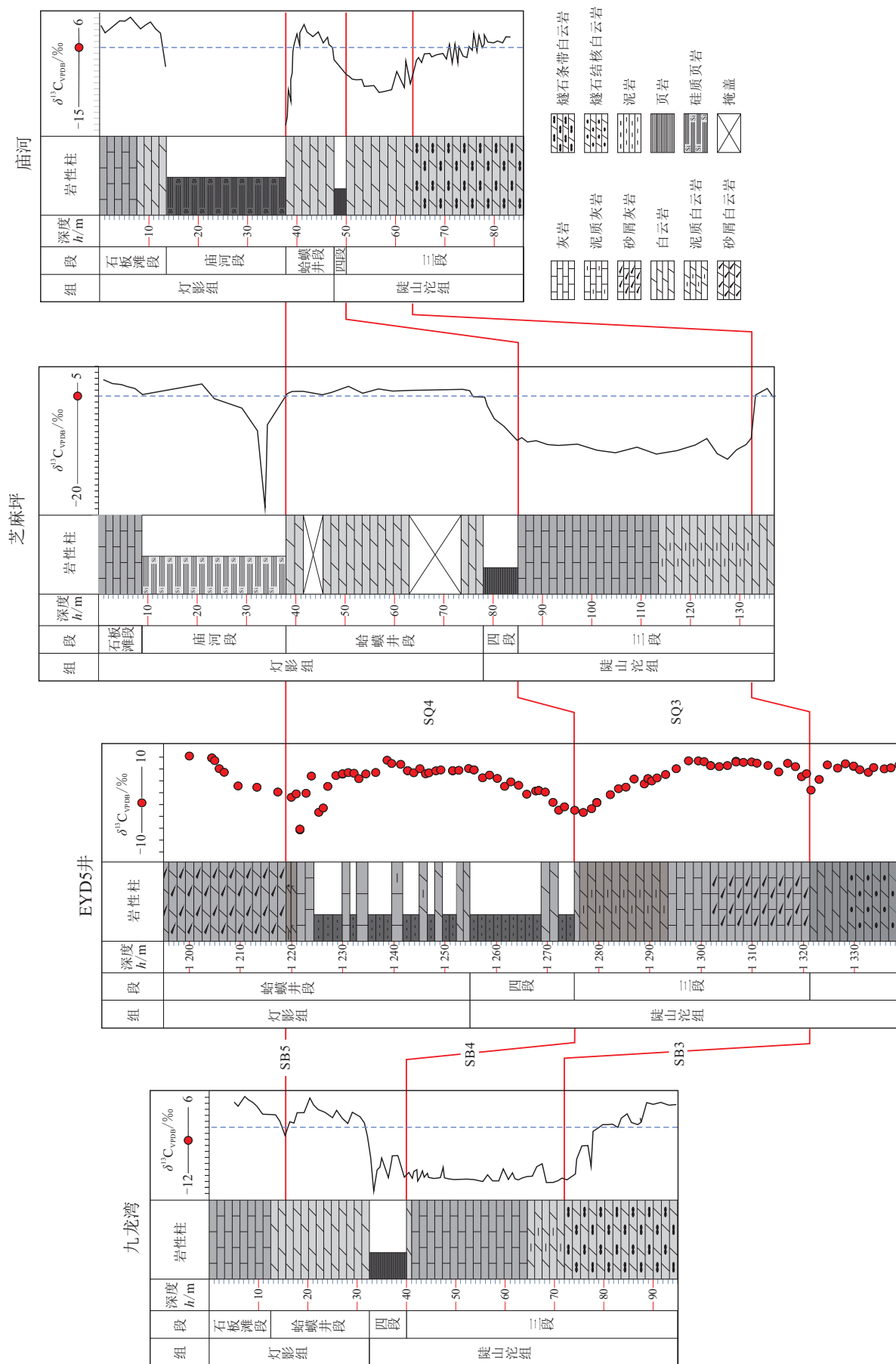


图 6 黄陵背斜周围埃迪卡拉系陡山沱组—灯影组蛤蟆井段地层划分对比图(据文献[49]修改)

Fig. 6 Stratigraphic division and correlation of the Ediacaran Doushantuo Formation—Hamajing Member of the Dengying Formation in the periphery of the Huangling anticline

面上均有显示^[28],在 EYD5 井剖面上,碳同位素曲线在蛤蟆井段中下部显示 1 次正漂移之后(HP3),又显示 1 次快速的负漂移(HN5),其曲线形态趋势与九龙湾剖面上几乎一致,在黄陵背斜的西缘、北缘、南缘均可以识别。与此同时,SQ4 由下而上所显示的台盆相页岩,潮下一潮间带页岩与灰岩、泥晶白云岩互层,潮坪相含泥质白云岩、岩溶角砾岩向上变浅的地层序列,以及 SQ4 顶部暴露侵蚀面与蛤蟆井段中部的层序界面^[50],在区域上均可对比(图 4, 6)。该异常的存在,为灯影组蛤蟆井段黄陵背斜周缘的识别与对比提供了新的依据,并且为峡东陡山沱组四段至灯影组蛤蟆井段岩石地层序列的厘定提供了新的支撑^[28]。

(2)正漂移 在影响海相碳酸盐岩碳同位素正漂移的众多因素中,生物的繁盛和有机碳的快速埋藏是 $\delta^{13}\text{C}$ 值正向漂移的重要因素。

HP1 出现在陡山沱组二段上部,可与尹崇玉等^[16]的 EP1 对比,其与大型具刺疑源类 *Tian zhushania* 出现一繁盛一消亡相对应。HP2 出现在陡山沱组三段中下部,可与尹崇玉等^[16]的 EP2 对比,该正漂移区间未见第一组合带最常见的 *Tian zhushania*;高生物产率可能是 HP1 和 HP2 持续稳定的主要因素。HP3 出现在灯影组蛤蟆井段中下部,与该时期藻类生物的繁盛存在一定关系,在九龙湾剖面存在相似碳同位素曲线^[28]。

5 TOC 特征分析

对海洋生物、现代海洋沉积和古代海相地层中有机质含量分布特征和模拟实验的研究表明,影响海相沉积有机质富集的主要因素有沉积物形成时水体中的生物产率、沉积速率、沉积及早期成岩作用阶段的氧化还原环境、海底深部流体作用等。在海相沉积中主要有欠补偿浅水—深水盆地、台缘斜坡、半闭塞—闭塞欠补偿海湾和蒸发潟湖为高有机质丰度烃源岩发育的最有利的沉积环境。

在 HN1 负漂移期间,碳质含量极低, $w(\text{TOC})$ 平均值仅为 0.22%。该时期属于 Marinoan 冰期后,早期海侵阶段,处于浅缓坡沉积环境(图 4),生物尚未大规模复苏,没有足够的生物产率来支撑有机质的富集。

在 HN1 与 HN2 之间的碳同位素曲线没有明显的规律,一直呈较剧烈波动状,但垂向上有向上逐渐增大的趋势。该区间主要沉积灰黑色、黑色含炭质泥岩、泥岩,夹少量深灰色泥晶白云岩、泥晶灰岩,泥岩含磷质砾屑、含丰富的黄铁矿颗粒,反映台盆相

沉积环境(图 4)。在该区间 $w(\text{TOC})$ 整体较高,最大值为 3.38%,最小值为 0.213%,平均值为 1.48%,该段近 40 m 厚的页岩层属于富有机质页岩段,是页岩气富集的有利层位。

HN2 区间碳同位素值向上变小, $w(\text{TOC})$ 也存在向上变小的趋势,该趋势可能是水体向上明显变浅趋势的体现,炭质含量明显降低。

HP1 期间碳同位素值稳定,以发育富含硅磷质结核的白云岩为特征,页岩几乎不发育,采集 $w(\text{TOC})$ 样品数相对较少,在 130 m 厚度范围内,仅采样 6 个,最大值 2.16%,最小值 1.45%,平均值 1.71%。该区间尽管页岩含量少,但有机质含量高,均为富有机质页岩。潮间带—潮下带沉积环境(图 4)、极丰富的硅磷质结核和偶尔发育的扰动状砂屑灰岩,暗示了上升洋流携带的富磷底水成为磷质的来源。这为该时期生物的繁盛提供了营养物质,也奠定了富有机质页岩形成的物质基础。

HP2 区间由于缺乏页岩,故未采集相应的 $w(\text{TOC})$ 分析样品。一般认为,有机质在缺氧条件下的有限降解,使有机质得到良好保存^[51-53]。浅滩沉积环境(图 4),海水浅,水体动荡,含氧量充足,不利于有机质的富集保存^[36]。

HN4 负漂移跨度大,漂移幅度明显,在中部达到最小负漂移值(图 4)。该区间包括 SQ3 上部的高位体系域(HST)和 SQ4 下部的海侵体系域(TST),SQ3 中 HST 体系域主要为潮下带—潮间带沉积,在该区间 $w(\text{TOC})$ 均值为 0.83%;SQ4 中 TST 体系域为台盆沉积,但除了底部海侵初期 $w(\text{TOC})$ 值较高,为 2.05%,之上 $w(\text{TOC})$ 极低,均值为 0.35%,为贫有机质页岩。HN4 区间内 $w(\text{TOC})$ 变化特征说明沉积环境并不是唯一的影响有机质富集的因素,生物繁盛、适宜的沉积速率及底层水为缺氧、滞静、低能等均是海相有效烃源岩发育的关键控制因子^[54]。

在 HP3 正漂移区间内, $w(\text{TOC})$ 极低,平均值为 0.35%,该段以发育黑色泥岩,夹灰色白云岩、灰岩为特征,局部见透镜状层理,属于潮下带—潮间带沉积环境(图 4)。该环境内,水体较动荡,含氧充足,不利于富有机质沉积物形成。

在 HN5 负漂移区间内,以发育灰褐色灰质白云岩为主,还发育岩溶角砾岩,属于潮坪沉积环境(图 4)。该区间由于页岩少,仅在夹层页岩中采集测试样品 2 个, $w(\text{TOC})$ 分别为 0.861%,2.17%,顶部的 $w(\text{TOC})$ 达到富有机质级别。该区间内整体水体浅,易暴露地表氧化,不利于有机质沉积物保存,但受古地貌的影响,会造成局部少量有机质富集。

表 2 EYD5 井埃迪卡拉系样品有机碳分析结果

Table 2 TOC values of samples from the Ediacaran in the Well EYD5

送样号	深度/m	w(TOC)/%	送样号	深度/m	w(TOC)/%
YD5-341H	1220.7	2.17	YD5-113H	1220.7	1.62
YD5-335H	1224.9	0.86	YD5-108H	1224.9	2.02
YD5-329H	1229.6	0.52	YD5-104H	1229.6	0.76
YD5-325H	1231.8	0.36	YD5-98H	1231.8	0.21
YD5-320H	1235.6	0.28	YD5-94H	1235.6	1.20
YD5-313H	1242.2	0.30	YD5-90H	1242.2	1.24
YD5-308H	1245.6	0.28	YD5-85H	1245.6	1.26
YD5-295H	1259.6	0.28	YD5-82H	1259.6	1.26
YD5-289H	1263.6	0.42	YD5-79H	1263.6	1.20
YD5-285H	1266.7	0.35	YD5-77H	1266.7	1.15
YD5-278H	1272.8	2.05	YD5-73H	1272.8	1.74
YD5-272H	1279.0	0.89	YD5-70H	1279.0	1.12
YD5-265H	1288.3	0.77	YD5-65H	1288.3	3.48
YD5-219H	1351.9	1.78	YD5-64H	1351.9	2.29
YD5-194H	1387.6	2.16	YD5-48H	1387.6	0.20
YD5-182H	1401.2	1.53	YD5-40H	1401.2	0.21
YD5-169H	1415.3	1.64	YD5-36H	1415.3	0.22
YD5-164H	1419.6	1.45	YD5-32H	1419.6	0.26
YD5-155H	1428.7	1.68	YD5-27H	1428.7	0.24
YD5-127H	1453.1	1.16	YD5-22H	1453.1	0.23
YD5-123H	1455.7	1.97	YD5-20H	1455.7	0.23
YD5-118H	1459.1	1.76	YD5-15H	1459.1	0.19

6 碳同位素组成变化与有机质发育关系讨论

碳同位素已成为研究震旦纪地质事件的重要手段之一,其特征主要与古海洋生物产率、有机质埋藏量及其氧化程度有关^[37]。影响海相沉积有机质富集的主要因素有沉积物形成时水体的生物产率、沉积速率、沉积及早期成岩作用阶段的氧化还原环境、海底深部流体作用等^[36]。生物产率、有机质的埋藏量是影响碳同位素和有机质发育的共同重要因素。关于在有着共同影响因素的情况下,碳同位素变化能否反映有机碳含量变化的问题,已有的研究表明,尽管碳酸盐岩中碳同位素变化,不能直接与富有机质页岩中有机碳含量相对应,但海水中碳、氧同位素组成的均一程度主要受海水循环速度、方式及溶解碳的滞留时间控制^[55],所以在采样密度足够大的情况下,碳稳定同位素的变化能反映沉积环境的变化。有机质的丰富程度敏感地反映着沉积环境的变化,并伴随岩性的变化^[56]。EYD5 井剖面为连续沉积的地质剖面,且发育大量浅海碳酸盐岩和代表海洋有机质组成的岩类。笔者以此为基础,尝试讨论碳

稳定同位素与有机质发育的关联性,并以此作为富有机质页岩段的对比依据。

首先,碳同位素正漂移区间内 $\delta^{13}\text{C}$ 值均为正值,HP1 和 HP3 区间相比较,HP1 区间内 $w(\text{TOC})$ 为 1.45%~2.16%,平均值 1.71%,对应大型具刺疑源类 *Tian zhushania* 的发育^[36],属于富有机质层段;HP3 区间内 $w(\text{TOC})$ 极低,平均值为 0.35%,对应藻类生物的繁盛,为贫有机质层段。HP1 和 HP3 区间内生物发育繁盛,但 HP1 区间内 $w(\text{TOC})$ 值明显比 HP3 区内 $w(\text{TOC})$ 值高。当海洋生物产率高,而且被埋藏时,可以引起海洋无机碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加^[36,57]。而生物总量一定时,沉积物中有机质的富集量与沉积速率有明显关系,快速或者低沉积速率都会导致有机质丰度的降低。

其次,在排除 HN1 是由全球事件导致的全球范围负异常的情况下,对比分析负漂移 HN2、HN3、HN4、HN5。上述负漂移区间以最大负漂移处为界可以划分为上下两部分,下部对应层序的高位体系域, $\delta^{13}\text{C}$ 值多为正值,生物不发育,水体浅,不利于有机质富集保存,导致海水中有有机碳含量增加,对应的碳酸盐岩沉积中 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对减少,有机质不能有效保存, $w(\text{TOC}) < 1\%$;上部对应于层序的海侵体系域, $\delta^{13}\text{C}$ 值多为正值。如果埃迪卡拉海洋中存在巨大的溶解有机碳储库,深海就会处于缺氧至富硫化氢的还原环境,并且与表层含氧海水间被一个氧化界面所分开^[8]。 $\delta^{13}\text{C}$ 值多为正值说明沉积环境整体位于氧化界面之上,加上埋藏速率较快,尽管处于生物发育期,仍不利于有机质丰度的提高。但当 $\delta^{13}\text{C}$ 值为负值时, $w(\text{TOC}) > 1\%$,可能此时水体相对较深,处于相对厌氧环境,利于有机质保存。另外,在陡山沱组二段下部 HN1 和 HN2 之间存在一段 $\delta^{13}\text{C}$ 值为负值的区间,说明整体位于有机碳库氧化界面之下。华南地区碳同位素研究也显示, $\delta^{13}\text{C}$ 值从浅水台地到深水盆地相区有由正变负的明显趋势^[42]。所以该区间对应深水缺氧环境,有利于有机质的富集, $w(\text{TOC})$ 为 0.213%~3.38%,平均值为 1.48%。上述分析表明该层段为陡山沱组最富有机质层段,碳同位素异常与有机碳含量没有明显的相关性,碳同位素的正、负漂移区间均可发育富有机质层段,持续的 $\delta^{13}\text{C}$ 值负值区间,对应深水沉积环境,利于富有机质页岩发育。

7 结 论

(1)陡山沱组可识别出 4 次负漂移,2 次正漂移区间,灯影组下部识别出 1 次负漂移,1 次正漂移区间,并可在区域范围内有效对比。

(2)HN4、HP3 与 HN5 的碳同位素组合和对应的岩石组合特征,为陡山沱组四段和灯影组庙河生物群的地层划分对比提供了新的佐证。

(3)碳同位素异常与有机碳含量无相关性,碳同位素的正、负漂移区间均可发育富有机质层段,持续的 $\delta^{13}\text{C}$ 值负值区间对应富有机质页岩层段发育。

参考文献:

- [1] Mcfadden K A, Huang J, Chu X, et al. Pulsed oxidation and bioloical evolution in the Ediacaran Doushantuo Formation[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(9): 3197-3202.
- [2] 刘鹏举, 尹崇玉, 唐烽, 等. 瓮安生物群中后生物化石研究进展及问题讨论[J]. 地质论评, 2007, 53(6): 728-735.
- [3] Zhu M, Strauss H, Shields G A. From snowball earth to the Cambrian bioradiation: Calibration of Ediacaran; Cambrian earth history in South China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 254(1/2): 1-6.
- [4] Zhu M, Zhang J, Yang A. Integrated Ediacaran (Sinian) chronostratigraphy of South China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 254(1/2): 7-61.
- [5] 王自强, 尹崇玉, 高林志, 等. 用化学地层学研究新元古代地层划分和对比[J]. 地学前缘, 2006, 13(6): 268-279.
- [6] 陈寿铭, 尹崇玉, 刘鹏举, 等. 峡东地区埃迪卡拉系陡山沱组碳同位素特征研究进展与国内外对比[J]. 地球学报, 2009, 30(4): 475-486.
- [7] 吕苗, 朱茂炎, 赵美娟, 等. 湖北宜昌茅坪酒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.
- [8] 蒋干清, 张世红, 史晓颖, 等. 华南埃迪卡拉纪陡山沱盆地氧化界面的迁移与碳同位素异常[J]. 中国科学: 地球科学, 2008, 38(12): 1481-1495.
- [9] Jiang G, Wang X, Shi X, et al. Organic carbon isotope constraints on the dissolved organic carbon (DOC) reservoir at the Cryogenian; Ediacaran transition[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 299(1/2): 159-168.
- [10] 周鹏, 张保民, 陈孝红. 湖北宜昌樟村坪埃迪卡拉系陡山沱组 C 同位素变化及成因[J]. 地质通报, 2017, 36(5): 780-791.
- [11] 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及其年代地层意义[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 207-223.
- [12] 陈寿铭, 尹崇玉, 刘鹏举, 等. 湖北峡东地区牛坪剖面埃迪卡拉系碳同位素组成及地质意义[J]. 世界地质, 2013, 32(4): 641-651.
- [13] 王家生, 甘华阳, 魏清, 等. 三峡“盖帽”白云岩的碳、硫稳定同位素研究及其成因探讨[J]. 现代地质, 2005, 19(1): 14-20.
- [14] 陈孝红, 李华芹, 陈立德, 等. 三峡地区震旦系碳酸盐岩碳氧同位素特征[J]. 地质论评, 2003, 49(1): 66-73.
- [15] 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(4): 382-388.
- [16] 尹崇玉, 刘鹏举, 陈寿铭, 等. 峡东地区埃迪卡拉系陡山沱组疑源类生物地层序列[J]. 古生物学报, 2009, 48(2): 146-154.
- [17] 刘鹏举, 尹崇玉, 高林志, 等. 湖北宜昌樟村坪埃迪卡拉系陡山沱组微体化石新材料及锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. 科学通报, 2009, 54(6): 774-780.
- [18] 刘鹏举, 尹崇玉, 陈寿铭, 等. 埃迪卡拉纪陡山沱组瓮安生物群中磷酸盐球状化石新材料及其问题讨论[J]. 地球学报, 2009, 30(4): 457-464.
- [19] 唐烽, 尹崇玉, 刘鹏举, 等. 华南伊迪卡拉纪“庙河生物群”的属性分析[J]. 地质学报, 2008(5): 601-611.
- [20] 柳永清, 尹崇玉, 高林志, 等. 峡东震旦系层型剖面沉积相研究[J]. 地质论评, 2003, 49(2): 187-194.
- [21] 李勇. 上扬子区晚震旦世地层古生物研究[D]. 西安: 西北大学, 2002.
- [22] 王自强, 高林志, 尹崇玉. 峡东地区震旦系等时层序地层格架的建立[J]. 中国区域地质, 2001, 20(4): 368-376.
- [23] 王自强, 高林志, 尹崇玉. 峡东地区震旦系层型剖面的界定与层序划分[J]. 地质论评, 2001, 47(5): 449-458.
- [24] 赵自强, 邢裕盛, 丁启秀, 等. 湖北震旦系[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988.
- [25] 丁莲芳, 李勇, 胡夏嵩, 等. 震旦纪庙河生物群[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 221.
- [26] Wang X, Erdtmann B, Chen X. Integrated 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.
- [27] 安志辉, 童金南, 叶琴, 等. 峡东青林口地区新元古代地层序列及沉积演变[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2014(7): 795-806.
- [28] An Z, Jiang G, Tong J, et al. Stratigraphic position of the Ediacaran Miaohu biota and its constraints on the age of the Upper Doushantuo $\delta^{13}\text{C}$ anomaly in the Yangtze Gorges area, South China[J]. Precambrian Research, 2015, 271: 243-253.
- [29] Zhu M, Lu M, Zhang J, et al. Carbon isotope chemostratigraphy and sedimentary facies evolution of the Ediacaran Doushantuo Formation in western Hubei, South China[J]. Precambrian Research, 2011, 225: 7-28.
- [30] 李儒峰, 刘本培. 碳氧同位素演化与碳酸盐岩层序地层学关系研究[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1996, 21(3): 29-34.
- [31] 陈锦石, 闻传芬, 钟华, 等. 古生代海洋碳同位素演化[J]. 地质科学, 1995, 30(4): 338-347.
- [32] 王可法. 海相碳酸盐碳同位素组成及其意义[J]. 地质地球化学, 1994, 22(5): 50-54.
- [33] 陈锦石, 钟华. 碳同位素地层学研究[J]. 矿物岩石地球化学通讯, 1990, 9(2): 113-114.
- [34] 王秋良, 袁胜元, 李长安. 江汉平原江陵剖面有机碳含量、碳同位素和磁化率的古气候意义[J]. 地质科技情报, 2006, 25(4): 59-62.
- [35] 王传尚, 李旭兵, 刘安, 等. 华南埃迪卡拉系斜坡相带碳稳定同位素特征[J]. 地质科技情报, 2014, 33(4): 1-5.
- [36] 陈践发, 张水昌, 鲍志东, 等. 海相优质烃源岩发育的主要影响因素[J]. 海相油气地质, 2006, 11(3): 49-54.
- [37] 彭花明, 郭福生, 严兆彬, 等. 浙江江山震旦系碳同位素异常及其地质意义[J]. 地球化学, 2006, 35(6): 577-585.
- [38] Xiaofeng W, Daquan M, Xiaohong C. Precambrian Geological Evolution in the Yangtze Gorges Area, China[J]. Gondwana Research, 1999, 2(4): 621-626.
- [39] Kaufman A, Knoll A. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications[J]. Precambrian Research, 1995, 73: 27-49.
- [40] Zhou C, Xiao S. Ediacaran $\delta^{13}\text{C}$ chemostratigraphy of South China[J]. Chemical Geology, 2007, 237: 89-108.

(下转第 93 页)

- 10(1):225-238.
- [17] 周四春,刘晓辉,童纯茜,等.地气测量技术及在隐伏矿找矿中的应用研究[J].地质学报,2014,88(4):736-754.
- [18] Kristiansson K, Malmqvist L, Persson W. Geogas prospecting: A new tool in the search for concealed mineralizations[J]. *Endeavour*, 1990, 14(1):28-33.
- [19] 童纯茜,李巨初,葛良全,等.地气物质纳米微粒的实验观测及其意义[J].中国科学:地球科学,1998,28(2):153-156.
- [20] 刘应汉,汪明启,赵恒川,等.寻找隐伏矿的“地气”测量方法原理及应用前景[J].青海国土经略,2006(3):41-42.
- [21] 王学求,张必敏,迟清华.穿透性地球化学迁移模型的实验证据[J].矿物学报,2009,29(增刊1):485-486.
- [22] 刘晓辉,童纯茜.地下玻璃固化体中元素垂直迁移规律初探[J].原子核物理评论,2009,26(1):64-68.
- [23] 周四春,刘晓辉,胡波.坑道地气测量试验及其意义[J].矿物学报,2015,35(增刊1):1063-1064.
- [24] Ye Rong, Zhang Bimin, Wang Yong. Mechanism of the migration of gold in desert regolith cover over a concealed gold deposit[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2015, 15(1):62-71.
- [25] 王学求,张必敏,姚文生,等.覆盖区勘查地球化学理论研究进展与案例[J].地球科学:中国地质大学学报,2012,37(6):1126-1132.
- [26] 周四春,刘晓辉,朱捌,等.地气测量勘查花岗岩隐伏铀矿研究[J].矿物学报,2011,31(增刊1):330-331.
- [27] 王学求,谢学锦,卢荫麻.地气动态提取技术的研制及在寻找隐伏矿上的初步试验[J].物探与化探,1995,19(3):161-171.
- [28] 童纯茜,李巨初.地气测量寻找深部隐伏金矿及其机理研究[J].地球物理学报,1999,42(1):135-142.
- [29] 徐景银,曾明中,付家灿.地气及金属活动态深穿透化探新方法的应用效果[J].湖北地矿,2003,17(2):19-23.
- [30] Wang Xueqiu, Zhang Bimin, Ye Rong. Nanoparticles observed by TEM from gold, copper-nickel and silver deposits and implication for mineral exploration in covered terrains[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2017(9):6014-6025.
- [31] 付小方,侯立伟,梁斌,等.甲基卡式花岗岩伟晶岩型锂矿床成矿模式与三维勘查找矿模型[M].北京:科学出版社,2017.
- [32] 王学求.地球气纳微金属测量的概念、理论与方法[C]//谢学锦,邵跃,王学求,等.走向21世纪矿产勘查地球化学.北京:地质出版社,1999:105-124.
- [33] Kristiansson K, Malmqvist L. Trace elements in geogas and their relation to bedrock composition[J]. *Geoeexploration*, 1987, 24:517-534.

(上接第73页)

- [41] Barfod G H, Albarède F, Knoll A H, et al. New Lu-Hf and Pb-Pb age constraints on the earliest animal fossils[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 2002, 201(1):203-212.
- [42] Condon D, Zhu M Y, Bowring S, et al. U-Pb ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China [J]. *Science*, 2005, 308:95-98.
- [43] 蒋干清,史晓颖,张世红.甲烷渗漏构造、水合物分解释放与新元古代冰后盖帽碳酸盐岩[J].科学通报,2006,51(10):1121-1138.
- [44] 王新强,史晓颖.华南伊迪卡拉纪碳同位素时空变化及其对生物演化的影响[J].中国科学:地球科学,2010,40(1):18-27.
- [45] 李超,程猛,Algeo Thomas J,等.早期地球海洋水化学分带的理论预测[J].中国科学:地球科学,2015,45(12):1829-1838.
- [46] Jiang G, Shi X, Zhang S, et al. Stratigraphy and paleogeography of the Ediacaran Doushantuo Formation (ca. 635—551 Ma) in South China[J]. *Gondwana Research*, 2011, 19(4):831-849.
- [47] Mcfadden K A, Xiao S, Zhou C, et al. Quantitative evaluation of the biostratigraphic distribution of acanthomorphic acritarchs in the Ediacaran Doushantuo Formation in the Yangtze Gorges area, South China[J]. *Precambrian Research*, 2009, 173:170-190.
- [48] 安志辉,童金南,叶琴,等.湖北宜昌樟村坪地区陡山沱组地层划分与对比[J].地球科学,2018,43(7):2206-2221.
- [49] 刘鹏举,尹崇玉,陈寿铭,等.华南峡东地区埃迪卡拉(震旦)纪年代地层划分初探[J].地质学报,2012,86(6):849-866.
- [50] Jiang G, 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(1/2):303-320.
- [51] 廖晓,王震亮,余侏宇,等.塔里木地柯坪地区奥陶系高丰度海相烃源岩成因探讨[J].地质科技情报,2018,37(2):59-64.
- [52] Demaison G J, Moore G T. Anoxic environments and oils source bed genesis[J]. *Organic Geochemistry*, 1980, 2(1):9-31.
- [53] Tyson R V, Pearson T H. Modern and ancient continental shelf anoxia[J]. *Geological Society of Special Publication*, 1991, 58:470-482.
- [54] 腾格尔.海相地层元素—碳氧同位素分布与沉积环境和烃源岩发育关系:以鄂尔多斯盆地为例[D].兰州:中国科学院兰州地质研究所,2004.
- [55] 王大锐,白玉雷.碳酸盐岩中稳定同位素对古气候的表征[J].石油勘探与开发,1999,26(5):30-32.
- [56] 周新科,许化政.海相碳酸盐岩的形成环境与有机质特征[J].石油与天然气地质,2009,30(3):337-342,349.
- [57] 严兆彬,郭福生,潘家永,等.碳酸盐岩 C, O, Sr 同位素组成在古气候、古海洋环境研究中的应用[J].地质找矿论丛,2005,20(1):53-56.