

# 云南镇雄羊场磷矿早寒武世无机碳、有机碳同位素研究

刘文杰<sup>1</sup>, 周艳玲<sup>1</sup>, 米云川<sup>2</sup>, 牛奕宁<sup>3</sup>, 吴佳怡<sup>3</sup>, 周余国<sup>3</sup>, 陈剑波<sup>1</sup>

(1. 云南大学 古生物研究院, 云南省地球系统科学中心重点实验室, 云南 昆明 650500; 2. 云南省地质调查院 (云南省地质科学研究所), 云南 昆明 650216; 3. 云南大学 地球科学学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 近年来云南省昭通市镇雄县发现了超大型隐伏磷矿(羊场磷矿), 目前针对该磷矿的研究主要集中在矿床学方面, 相关的沉积地球化学及古环境研究较少, 而且国内外对寒武纪早期纽芬兰世无机碳同位素( $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ )、有机碳同位素( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ )及其二者间关系的研究也鲜有报道。本文选取羊场磷矿3个钻孔(ZK001、ZK0701、ZK1512)开展高分辨率 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 研究, 取得以下主要认识: 从灯影组顶部至朱家箐组底部, $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 出现明显负漂移, 这与前人在华南及世界多地报道的Basal Cambrian Carbon Isotope Excursion(BACE)负漂移事件一致, 可能是由有机碳库氧化造成的; 3个钻孔中均未能发现Zhujiaping Carbon Isotope Excursion(ZHUCE)正漂移事件, 这可能是由于磷矿矿体产出层位存在短暂的沉积间断。尽管如此, 通过3个钻孔的无机碳同位素与前人报道的华南地区无机碳同位素综合曲线对比, 认为该磷矿产出时代属于寒武纪纽芬兰世幸运期; 对钻孔ZK001和ZK0701的无机碳、有机碳同位素对比研究, 发现二者差值( $\Delta\text{C}_{\text{carb-org}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{carb}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ )的平均值在灯影组中分别为28.8‰和22.2‰, 在朱家箐组下部分别上升到31.7‰和31.7‰(解耦), 朱家箐组中部开始往上分别减小至29.6‰和29.8‰; 朱家箐组中出现 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 解耦现象, 可能是初级生产力或碳埋藏的增加所导致。本研究初步揭示了羊场磷矿的产出时代和古环境演变过程, 同时也为区域地层对比提供了佐证。

**关键词:** 早寒武世; 有机碳同位素; 无机碳同位素; 磷矿; 云南昭通

中图分类号: P597; P619.21<sup>+</sup>3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)05-1086-13

## Inorganic and organic carbon isotopes from Early Cambrian Yangchang phosphate deposit in Zhenxiong County, Yunnan Province

LIU Wen-jie<sup>1</sup>, ZHOU Yan-ling<sup>1</sup>, MI Yun-chuan<sup>2</sup>, NIU Yi-ning<sup>3</sup>, WU Jia-yi<sup>3</sup>, ZHOU Yu-guo<sup>3</sup>  
and CHEN Jian-bo<sup>1</sup>

(1. Yunnan Key Laboratory of Earth System Science, Institute of Palaeontology, Yunnan University, Kunming 650500, China;

2. Yunnan Institute of Geological Survey (Yunnan Institute of Geological Sciences), Kunming 650216, China; 3. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China)

**Abstract:** The recently discovered Yangchang deposit in Zhenxiong County, Zhaotong City, Yunnan Province is an ultra-large-scaled buried phosphate deposit. Previous research on this deposit mainly focused on the metallogeny, while the study of sedimentary geochemistry and the paleoenvironment is lacked. More importantly, the inorganic ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ ) and organic ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ) carbon isotopes as well as their relationships in the early Cambrian were rarely reported. In this study, three drill cores (ZK001, ZK0701, ZK1512) in Yangchang phosphate deposit were selected

收稿日期: 2024-05-14; 接受日期: 2024-07-19; 编辑: 尹淑苹; 英文审校: 崔浩

基金项目: 云南省科技厅项目(202302A0370014); 云南大学新一轮“双一流”建设项目

作者简介: 刘文杰(2001-), 女, 硕士研究生, 沉积地球化学专业, E-mail: liuwenjie1@stu.ynu.edu.cn; 通讯作者: 陈剑波(1986-), 男, 副研究员, 主要从事沉积地球化学、古环境与古气候重建研究, E-mail: jichen@ynu.edu.cn.

for high-resolution investigations of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ . Both  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  show negative shifts in the top Precambrian Dengying Formation and the bottom of its overlying Zhujiqing Formation, which is consistent with the global Basal Cambrian Carbon Isotopic Excursion (BACE), likely due to the oxidation of organic carbon reservoir. However, we did not find significant positive shifts in the overlying strata (i. e., Zhujiqing Carbon Isotopic Excursion, ZHUCE), which may be caused by sedimentary hiatus given that the Yangchang phosphate deposit is mostly intra-clastic phosphorus-rich deposits. Nevertheless, we propose that this phosphate deposit was mainly formed during the Fortunian according to the comparison between the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  in the three drill cores and the composite profile of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  in South China. The comparisons for the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  values in the drill cores ZK001 and ZK0701, show that the average value of the  $\Delta\text{C}_{\text{carb-org}}$  (difference between  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ) is 28.8‰ and 22.2‰ in the Dengying Formation, and these values change to 31.7‰ and 31.7‰ at the bottom of the Zhujiqing Formation, and 29.6‰ and 29.8‰, in the middle and upper of the Zhujiqing Formation, respectively. We propose that the decoupled  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  occurring in the middle of the Zhujiqing Formation may be caused by the increased primary productivity or buried organic carbon. In summary, the high-resolution paired inorganic and organic carbon isotopes in this work indicate the formation time of Yangchang phosphate deposit and shed light on associated paleo-environmental changes, which also support the regional stratigraphic correlation.

**Key words:** Early Cambrian; organic carbon isotopes; inorganic carbon isotopes; phosphate deposit; Zhaotong, Yunnan

**Fund support:** Project of the Department of Science and Technology of Yunnan Province (202302A0370014); Construction Projects of the Yunnan University of A New Round of “Double First-Class”

寒武纪早期是地球演化历史中一个极具标志性的时期,发生了诸多全球性的生物-地质-环境事件,例如动物的爆发式演化(张兴亮, 2021)、全球氧含量快速增加(Zhang and Cui, 2016)、大规模成磷事件(Cook, 1992)和 Ni-Mo-PGE 矿化事件(Lan *et al.*, 2017)等等,表明了地球环境的巨大转变(Halverson *et al.*, 2005),对寒武纪早期的研究一直是地球科学的前沿热点(朱茂炎等, 2019)。

寒武纪海相碳酸盐岩无机碳同位素( $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ )被广泛用于地层划分和对比(Zhu *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2009)。朱茂炎等(2019)总结了华南寒武纪碳同位素综合变化曲线,发现  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  在寒武纪出现了多次不同幅度的正向或负向偏移,如 BACE(Basal Cambrian Carbon Isotope Excursion)负异常(Zhu *et al.*, 2006)、ZHUCE(Zhujiqing Carbon Isotope Excursion)正异常(Zhu *et al.*, 2006)、SPICE(Steptoean Positive Carbon Isotope Excursion)正异常等(Saltzman *et al.*, 2000)。华南的碳同位素基本上可以反映全球变化特征(熊轶伟等, 2022; Topper *et al.*, 2022),但是国内外学者目前对该区寒武纪早期有机碳同位素( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ )的研究相对较少,对  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  与  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  之间关系的研究也鲜有报道。

近年来,云南省地质调查院在云南镇雄县发现

了超大型隐伏磷矿(羊场磷矿),并对其开展了成矿-沉积环境、矿产地质特征等初步研究,而对磷矿矿体赋存层位及其上下地层的沉积地球化学及古环境研究较少。因此,本文选取羊场磷矿 3 个钻孔(ZK001、ZK0701、ZK1512),以矿体所在的下寒武统朱家箐组为主,开展了无机碳同位素、有机碳同位素研究,进而与华南下寒武统进行地层对比,并对  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  与  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  的协变关系及其变化原因进行了探讨。

## 1 研究区地质概况

华南板块在寒武纪早期位于赤道地区(图 1),羊场磷矿处于扬子陆块南部碳酸盐岩台地中的威宁-昭通褶冲带(薛珂等, 2019; 吕俊等, 2021; 米云川等, 2021)。钻孔显示矿区深部地层发育有震旦系灯影组至寒武系明心寺组,其中下寒武统朱家箐组底部为磷矿赋矿层位,岩性主要为白云岩,厚度约 57~98 m(图 2、图 3、图 4)。本文研究的钻孔所包含的地层及其主要岩性特征,从上往下依次描述如下。

明心寺组:中部岩性为条带状硅质岩,富含化石,多为遗迹化石和实体化石,发育有方解石脉;下部岩性为粉砂岩。

牛蹄塘组:上部岩性为泥质粉砂岩,方解石条带

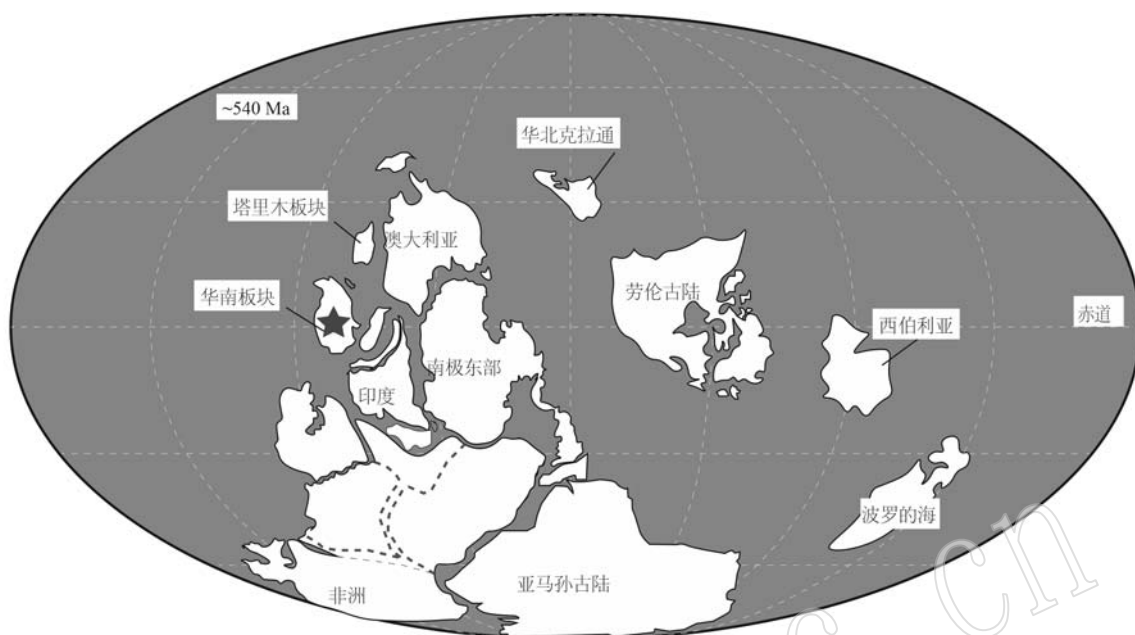


图 1 华南板块寒武纪古地理位置(修改自 Sun *et al.*, 2023, ★表示羊场磷矿的位置)

Fig. 1 Paleogeographic map of South China Block (modified from Sun *et al.*, 2023, ★ is the location of the Yangchang phosphate deposit)

增多;中部可见黑色粉砂质页岩,有机质含量高,岩性逐渐转为灰色粉砂岩,夹较厚灰岩;下部为黑色泥质粉砂岩、含碳粉砂质页岩,偶见草莓状黄铁矿,底部可见灰黑色中至厚层含黄铁矿泥质粉砂岩。

朱家箐组:上部岩性为深灰色中厚层含钙质砂屑磷质岩;上部到中部间的过渡带岩性为灰白色断层角砾岩;中部岩性为灰-灰黑色中层砂屑磷块岩;中部与下部间的过渡带岩性由灰色含磷质灰岩转为灰-深灰色条纹状砂屑含炭质白云质硅质岩;下部为灰黑色粉砂岩与灰色微晶白云岩互层。需要说明的是,由于寒武纪早期古生物化石较少,梅树村组时限范围较大,尚没有明确的梅树村组上下界限,难以开展地层对比,因而本文采用 Zhu 等(2001)推荐的朱家箐组。

灯影组(顶部):主要岩性为灰色微晶白云岩。

在羊场磷矿的地层中少见化石,这增加了与其他地区早寒武系地层对比的困难性,因此本文通过对羊场磷矿高分辨率的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  化学地层分析来进行华南地区地层对比,同时结合钻孔中代表性样品的岩石学特征,解释无机碳、有机碳同位素解耦/耦合的发生机制和沉积古环境的科学问题。

## 2 样品及测试

选取 3 个钻孔 ZK001、ZK0701、ZK1512(表 1),在岩芯样品采集过程中已避开方解石脉,然后将岩石样品研磨至 200 目,称取适量干燥后的岩石粉末置于顶空瓶中,加入磷酸后水浴 70°C 加热 18 h,待上机进行无机碳同位素测试。有机碳同位素前处理则是将约 10~15 g 的样品粉末置于烧杯中,加入过量的 2 mol/L 盐酸直到无机碳被完全去除,随后用超纯水清洗多次至中性,在冻干机中干燥后再次研磨成粉末,取适量样品称重后包在锡杯中,准备后续测试。

表 1 各个钻孔采样与碳同位素测试分析汇总表  
Table 1 Summary of sampling and carbon isotope analysis of each drill core

钻孔编号	采样孔深/m	碳同位素测试样品/个		重复样测试个数/个	
		$\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$
ZK001	76.4	136	136	10	12
ZK0701	596.7	221	221	15	11
ZK1512	496.6	386	-	18	-

碳同位素分析测试在云南大学古生物研究院完成,全岩  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  使用 Thermo Fisher 253 Plus 气体稳定同位素质谱仪进行测试,全岩  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  和有机碳含量 ( $C_{\text{measured}}/\%$ ) 使用 Thermo Fisher Delta V Advantage 质谱仪、EA-IRMS 元素分析仪分别进行测试。在  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  测试过程中,首先测试 2 次标样,随后平均每测试 15 个未知样品插入 1 次标样,平均间隔 30 个未知样品插入 1 次重复样;在  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  和  $C_{\text{measured}}$  测试过程中,首先测试 1 个空白样品和 3 个标样,随后平均每 15 个未知样品插入 1 次标样,平均间隔 30 个未知样品插入 1 次重复样,以进行分析质量监控和仪器稳定性监测。其中  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  测试分析采用的标样是国家标准物质 GBW04405 (北京附近的奥陶纪碳酸盐岩),推荐值为  $\delta^{13}\text{C} = (0.57 \pm 0.03)\text{‰}$  PDB (Yuan *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2023),实验室对该标样的长期测试结果为  $\delta^{13}\text{C} = (0.58 \pm 0.07)\text{‰}$  PDB,在测本批样品过程中,标样均值为  $\delta^{13}\text{C} = (0.59 \pm 0.14)\text{‰}$ 。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  和  $C_{\text{measured}}$  分析测试过程中,使用的标样均为 OAS (CatNo. IVA33802151),其推荐值为  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}} = (-28.85 \pm 0.10)\text{‰}$ ,在测本批样品过程中,标样均值

为  $\delta^{13}\text{C} = (-28.87 \pm 0.2)\text{‰}$ 。样品总有机碳含量 (TOC/%) 计算方法为  $\text{TOC} = \text{经过酸解除去无机碳后的样品量} / \text{原始称样量} \times C_{\text{measured}}$ 。同时,选取钻孔 ZK1512 中的代表性样品 (泥微晶砂屑灰岩、泥晶含钙质白云岩) 在偏光显微镜下进行岩相学鉴定,该项工作由云南省地质矿产勘查开发局中心实验室完成。

### 3 结果

本研究所获得的钻孔 ZK001、ZK0701、ZK1512 全岩无机碳同位素以及钻孔 ZK001、ZK0701 全岩有机碳同位素组成,测试分析结果简要描述如下:

(1) 在钻孔 ZK001 中 (图 2),  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  值在灯影组顶部偏正,分布范围为  $-4.9\text{‰} \sim 1.4\text{‰}$ ,平均值为  $0.3\text{‰}$ ;随后往上在朱家箐组底部至牛蹄塘组底部中呈现出两次负偏、两次正偏的变化趋势,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  值在  $-7.0\text{‰} \sim 0.4\text{‰}$  之间变化,平均值为  $-3.6\text{‰}$ 。有机碳同位素与无机碳同位素变化类似,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值在灯影组顶部也呈现出负偏趋势,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值在  $-33.2\text{‰} \sim -26.3\text{‰}$  之间变化,平均值为  $-30.1\text{‰}$ ;随后在朱家箐组底部

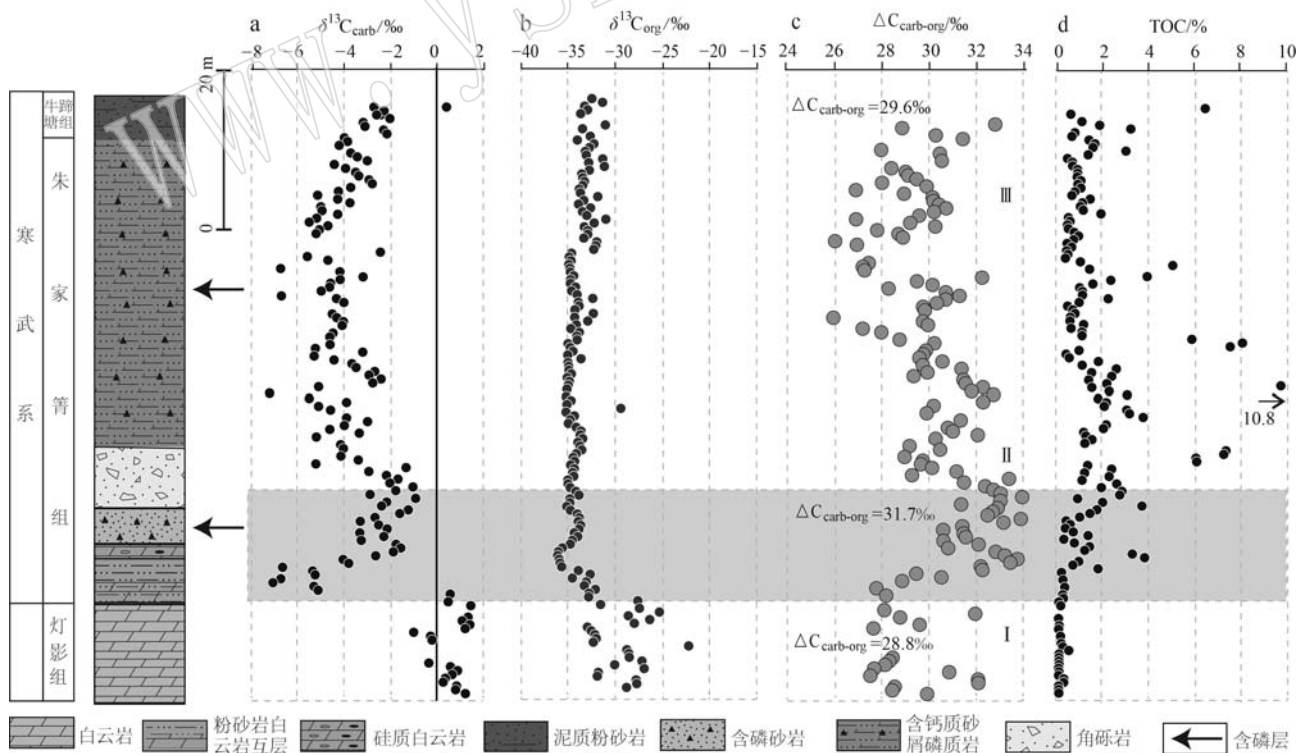


图 2 钻孔 ZK001 的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  (a)、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  (b)、 $\Delta\text{C}_{\text{carb-org}}$  (c) 和 TOC (d) 曲线图 (图中灰色区域表示  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  与  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  解耦区域)

Fig. 2 Plots of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  (a),  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  (b),  $\Delta\text{C}_{\text{carb-org}}$  (c) and TOC (d) in drill core ZK001 (the gray area in the figure represents the decoupling area between  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ )

至牛蹄塘组底部中又逐渐正偏,其分布范围为-36.0‰~-29.4‰,平均值为-33.8‰。无机碳与有机碳同位素之间差值  $\Delta C_{carb-org}$  (计算方法为  $\Delta C_{carb-org} = \delta^{13}C_{carb} - \delta^{13}C_{org}$ ) 的平均值在灯影组内为 28.8‰ (阶段 I),朱家箐组底部上升到 31.7‰ (阶段 II),随后在朱家箐组中上部至牛蹄塘组底部  $\Delta C_{carb-org}$  平均值又减小至 29.6‰ (阶段 III)。由此可见,  $\delta^{13}C_{org}$  与  $\delta^{13}C_{carb}$  表现出耦合、解耦再次耦合的现象。在灯影组内,TOC 值在 0.0%~0.5% 之间变化,平均值为 0.1%;在朱家箐组内,TOC 值在 0.1%~10.8% 之间变化,平均值为 1.8%。

(2) 在钻孔 ZK0701 中(图 3),  $\delta^{13}C_{carb}$  在灯影组内表现出先正偏后负偏的趋势,  $\delta^{13}C_{carb}$  值在 -2.6‰~1.9‰ 之间变化,平均值为 0.1‰。随后往上在朱家箐组内呈先负偏后正偏的变化趋势,  $\delta^{13}C_{carb}$  值

-6.9‰~0.4‰ 之间变化,平均值为 -2.6‰。在牛蹄塘组内  $\delta^{13}C_{carb}$  值发生了两次负偏、两次正偏,  $\delta^{13}C_{carb}$  值在 -6.5‰~0.4‰ 之间变化,平均值为 -1.5‰;在明心寺组内,  $\delta^{13}C_{carb}$  值在 -4.6‰~0.7‰ 之间变化,平均值为 -1.0‰。  $\delta^{13}C_{org}$  值在灯影组顶部呈现显著的负漂移,  $\delta^{13}C_{org}$  值在 -34.4‰~-15.4‰ 之间变化,平均值为 -26.9‰;随后在朱家箐组内又逐渐正偏,其分布范围为 -35.4‰~-25.0‰,平均值为 -33.5‰;在牛蹄塘组内  $\delta^{13}C_{org}$  继续正偏,  $\delta^{13}C_{org}$  值在 -33.3‰~-26.4‰ 之间变化,平均值为 -30.2‰;在明心寺组内  $\delta^{13}C_{org}$  正偏,  $\delta^{13}C_{org}$  值在 -28.7‰~-25.0‰ 之间变化,平均值为 -26.9‰。在底部灯影组内  $\Delta C_{carb-org}$  平均值为 22.2‰ (阶段 I),朱家箐组底部  $\Delta C_{carb-org}$  平均值上升到 31.7‰ (阶段 II),然后在朱家箐组顶部至牛蹄塘组顶部中  $\Delta C_{carb-org}$  平均值降为

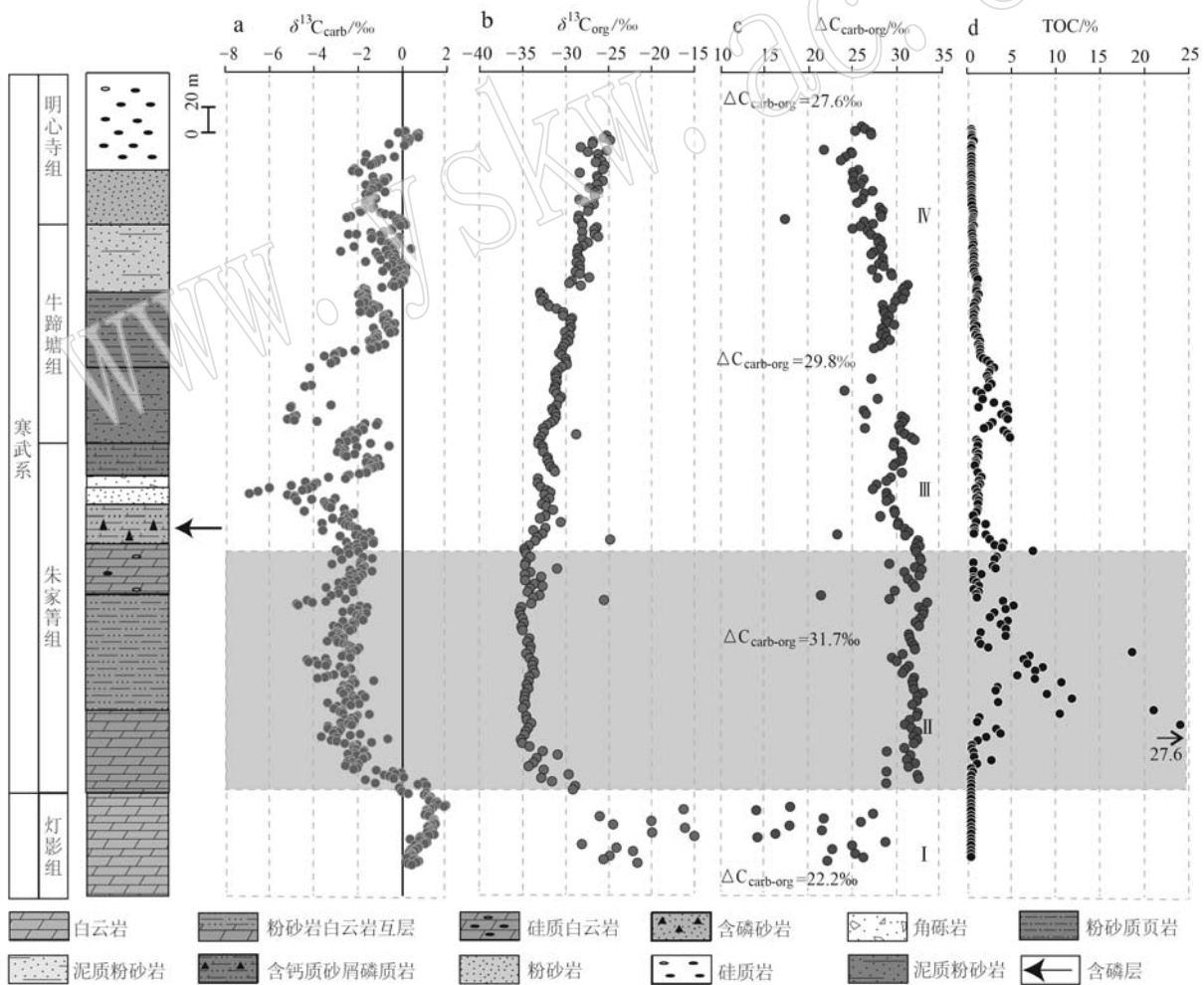


图 3 钻孔 ZK0701 的  $\delta^{13}C_{carb}$  (a)、 $\delta^{13}C_{org}$  (b)、 $\Delta C_{carb-org}$  (c) 和 TOC (d) 曲线图(图中灰色区域表示  $\delta^{13}C_{carb}$  与  $\delta^{13}C_{org}$  解耦区域)

Fig. 3 Plots of  $\delta^{13}C_{carb}$  (a)、 $\delta^{13}C_{org}$  (b)、 $\Delta C_{carb-org}$  (c) and TOC (d) in drill core ZK0701 (the gray area in the figure represents the decoupling area between  $\delta^{13}C_{carb}$  and  $\delta^{13}C_{org}$ )

29.8‰(阶段Ⅲ),最后在牛蹄塘组顶部至明心寺组内  $\Delta C_{carb-org}$  平均值继续下降到 27.6‰(阶段Ⅳ)。钻孔 ZK0701 的  $\delta^{13}C_{org}$  与  $\delta^{13}C_{carb}$  同样也表现出耦合、解耦再次耦合的现象,与钻孔 ZK001 中的变化趋势相同。在灯影组内,TOC 值在 0.0%~2.4%之间变化,平均值为 0.3%;在朱家箐组内,TOC 值在 0.3%~27.6%之间变化,平均值为 3.3%;在牛蹄塘组内,TOC 值在 0.1%~4.6%之间变化,平均值为 1.3%;在明心寺组内,TOC 值在 0.0%~0.3%之间变化,平

均值为 0.1%。

(3) 在钻孔 ZK1512 中(图 4), $\delta^{13}C_{carb}$  值在灯影组顶部介于-2.6‰~-2.0‰之间,平均值为-2.4‰。在朱家箐组中呈现出负偏的趋势, $\delta^{13}C_{carb}$  值在-7.9‰~0.3‰之间变化,平均值为-3.9‰。在牛蹄塘组内呈现出先正偏后负偏又逐渐正偏的趋势, $\delta^{13}C_{carb}$  值在-6.6‰~0.6‰之间变化,平均值为-2.3‰。在明心寺组内,变化较为稳定, $\delta^{13}C_{carb}$  值在-8.0‰~-0.6‰之间变化,平均值为-1.4‰。

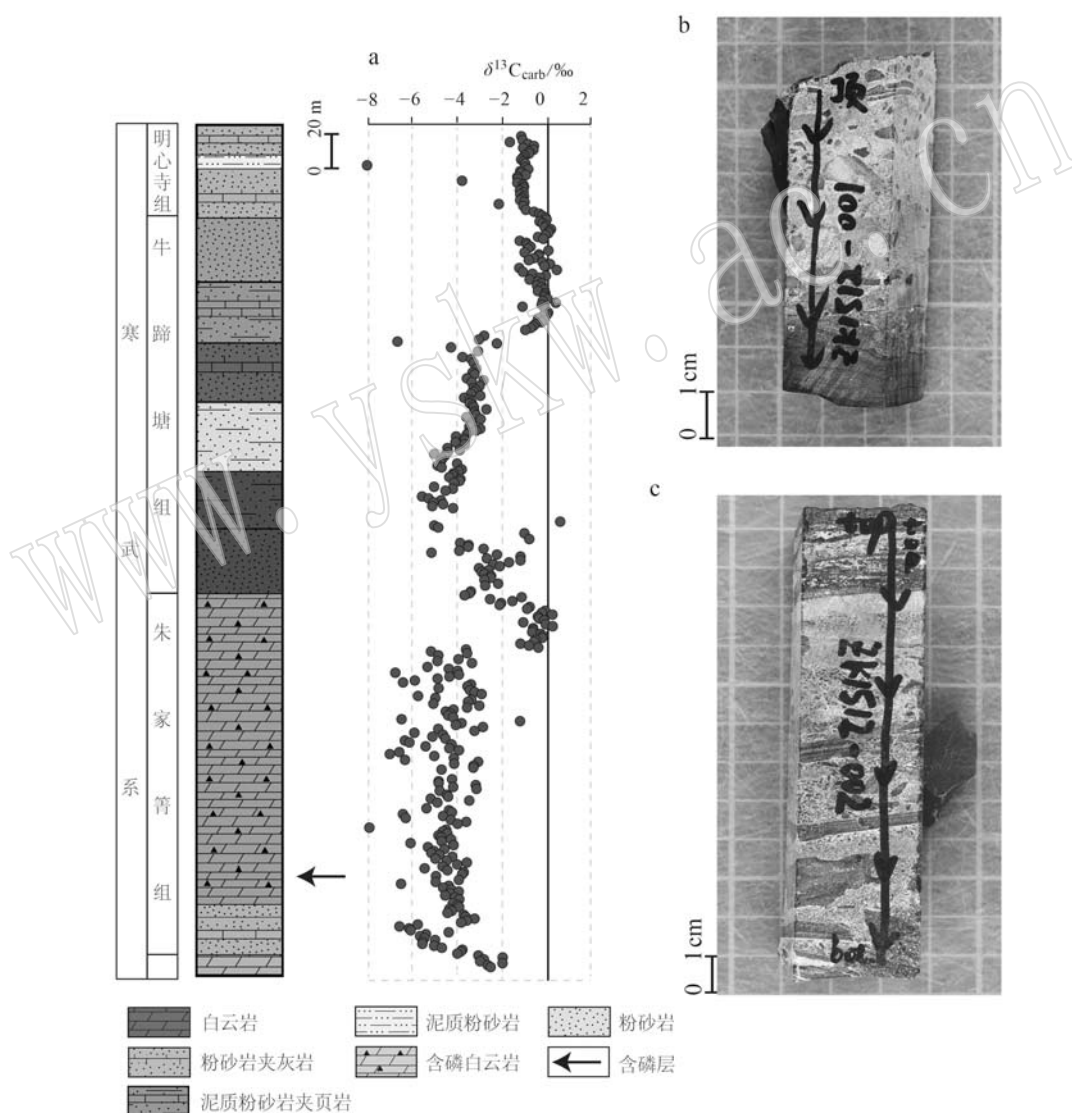


图 4 钻孔 ZK1512 的  $\delta^{13}C_{carb}$  曲线图(a)和典型岩芯样品手标本照片(b,c)

Fig. 4 Plot of  $\delta^{13}C_{carb}$  (a) in drill core ZK1512 and hand specimens of drill core (b, c)

b 和 c 为钻孔 ZK1512 牛蹄塘组手标本样品,可见明显的沉积突变,且岩石中可见内碎屑型富磷沉积

b and c are hand specimen from the Niutitang Formation in drill core ZK1512, with obvious sedimentary mutations visible, and internal clastic phosphorus rich deposits are visible in the rocks

## 4 讨论

### 4.1 区域地层对比及磷矿成矿时代探讨

成岩作用会显著影响沉积岩的原始地球化学组成,因而必须先开展地球化学数据的成岩作用评估,

其中, $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  和  $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$  的相关性是最常采用的判断标准之一 (Reis *et al.*, 2019)。在本研究中,钻孔 ZK001、ZK0701、ZK1512 的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$  与  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  相关性较小, $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$  相关系数  $R^2$  分别为 0.2、0.4、0.2 (图 5a、5b、5c),且  $P$  值都远小于 0.0001。另外, $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}} < -10\text{‰}$  的样品通常认为受到了成岩作用的

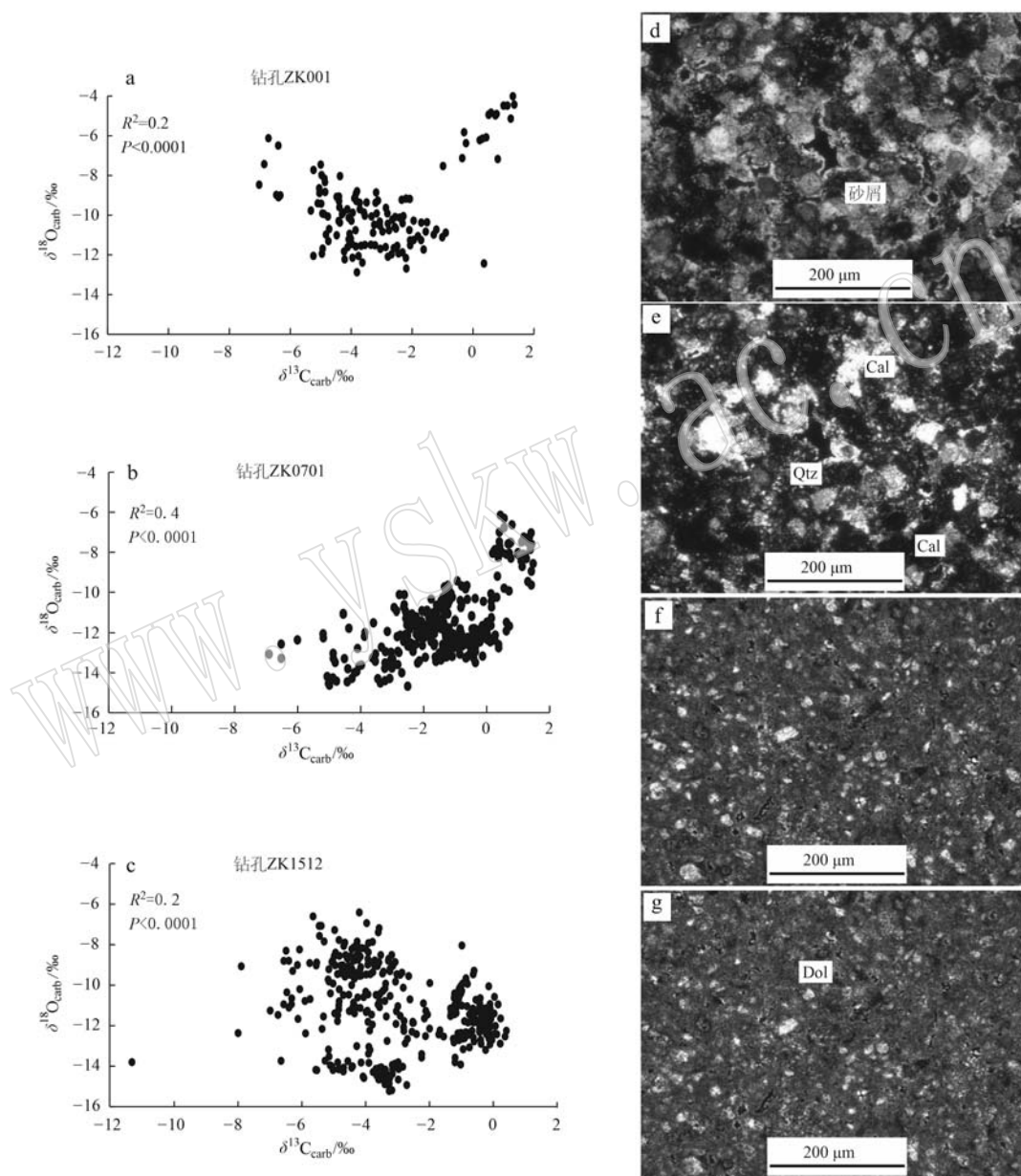


图 5 钻孔 ZK001、ZK0701 和 ZK1512 全岩碳氧相关性图解 (a~c) 和钻孔 ZK1512 代表性样品的岩石薄片偏光显微镜照片 (d~g)

Fig. 5 Cross-plots of  $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$  versus  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  from three drill cores (a~c) and microscopic photos of representative thin-sections from the drill core ZK1512 (d~g)

d—ZK1512 泥晶砂屑灰岩的单偏光照片; e—ZK1512 泥晶砂屑灰岩的正交偏光照片; f—ZK1512 深灰色泥晶含钙质白云岩的单偏光照片; g—ZK1512 深灰色泥晶含钙质白云岩的正交偏光照片; Qtz—石英; Cal—方解石; Dol—白云石  
d—transmission plane polarized light conditions, argillaceous microcrystalline sand-chip limestone in drill core ZK1512; e—transmission perpendicular polarized light conditions, argillaceous microcrystalline sand-chip limestone in drill core ZK1512; f—transmission plane polarized light conditions, dark gray calcareous argillaceous limestone in drill core ZK1512; g—transmission perpendicular polarized light conditions, dark gray calcareous argillaceous limestone in drill core ZK1512; Qtz—quartz; Cal—calcite; Dol—dolomite

影响(Li *et al.*, 2009),而本次研究的样品超过 2/3 高于该值。

针对代表性样品的岩相学研究也表明这些钻孔岩芯具有保存原始碳同位素信号的潜力。例如,泥晶砂屑灰岩中磷质含量 3%~5%,砂屑呈次棱角状、次圆状、圆状(图 5d),由泥微晶方解石和少量胶磷矿(细晶氟磷灰石集合体)组成,填隙物中的方解石以泥微晶为主(图 5e),白云石呈泥晶状,颜色较深(图 5f、5g),可排除后期成岩作用的影响。

在缺乏生物地层格架的情况下, $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  常被用作内部地层划分以及不同地区地层对比的重要依据(Zhu *et al.*, 2007; Oehlert and Swart, 2014)。朱茂炎等(2019)总结了华南寒武系碳同位素综合曲线,其中寒武系下部碳同位素数据依据滇东北地区肖滩阶上部至筇竹寺阶底部地层,筇竹寺阶中上部至都

匀阶底部碳同位素来自贵州中部的地层剖面。综合地层对比表明,纽芬兰统底部 BACE 负异常事件和第二阶下部 ZHUCE 正异常事件可进行寒武系地层对比(朱茂炎等, 2021)。本文将羊场磷矿钻孔的碳同位素与朱茂炎等(2019)报道的华南寒武系碳同位素综合曲线(图 6 中曲线 IV 所示)进行对比。

钻孔 ZK0701 的碳同位素变化曲线(以下简称曲线 I)下部呈现出由正偏负的趋势。钻孔 ZK001 的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  值变化曲线(以下简称曲线 III)在下部整体上也呈现出相似的变化趋势,可以对应曲线 IV 灯影组上部到幸运阶底部(图 6 灰色区域)。曲线 I 的中部, $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  值在  $-6.9\text{‰}$ ~ $-0.7\text{‰}$  之间波动,整体也呈现出正偏的趋势,变化较为稳定。钻孔 ZK1512(以下简称曲线 II)在朱家箐组内变化也较为稳定,碳同位素值整体呈现出正偏的趋势,曲线 III 在朱家箐组

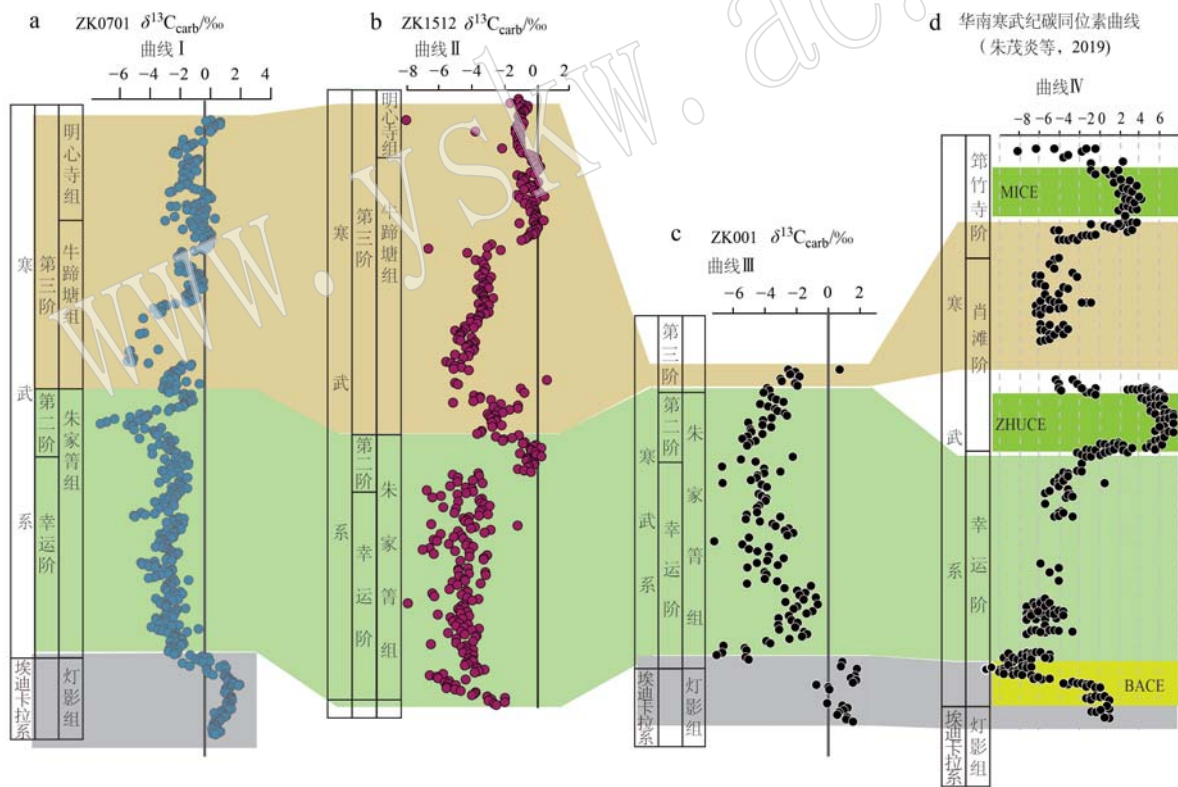


图 6 羊场磷矿钻孔无机碳同位素(a~c)与华南寒武系碳同位素综合曲线(d, 修改自朱茂炎等, 2019)对比图  
 Fig. 6 Comparisons of carbon isotope curves between the three drill cores of Yangchang phosphate deposit (a~c) and the composite Cambrian profile from South China(d, after Zhu Maoyan *et al.*, 2019)

图中灰色区域表示为灯影组对应的碳同位素变化趋势,浅绿色区域表示朱家箐组对应的碳同位素变化趋势,浅黄色区域表示牛蹄塘组-明心寺组对应的碳同位素变化趋势

gray area represents the carbon isotope change trend corresponding to the Dengying Formation; light green area represents the carbon isotope change trend corresponding to the Zhujiaping Formation; light yellow area represents the carbon isotope change trend corresponding to the Niutitang-Mingxinsi Formation



内变化趋势与曲线 I 和曲线 II 变化一致,可与曲线 IV 的幸运阶下部至上部对应(图 6 浅绿色区域)。在曲线 I 和曲线 II 的上部  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  值逐渐正偏,最终在 0‰附近变化,在曲线 III 的上部  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  值继续呈现出正偏的趋势,可以与曲线 IV 肖滩阶中上部至筇竹寺阶下部变化一致(图 6 浅黄色区域)。

由此可见,羊场磷矿的碳同位素变化曲线与华南寒武系碳同位素综合曲线演变趋势基本一致,灯影组顶部表现为稳定正值之后发生明显的负漂移,可以对应寒武系底界 BACE 事件。紧接其上出现的磷矿富集,表明矿床的成矿时代应该属于纽芬兰世幸运期。

ZHUCE 正异常在西伯利亚和华南大部分剖面上表现为一个  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  值大于 4‰的高峰(Kouchinsky *et al.*, 2007),但在羊场磷矿的 3 个钻孔中均未发现。岳维好等(2022)对羊场磷矿成矿古地理环境的解释为由于海侵作用的影响形成了具有多期次沉积旋回特征的胶磷矿硬地,富含颗粒结构的磷块岩矿层。结合图 4b 和图 4c,可见磷矿矿体多为内碎屑型的富磷沉积,且磷块岩的岩体中间有明显的颜色分层突变现象,表明在羊场磷矿的朱家箐组顶部与牛蹄塘组底部之间可能存在沉积间断,这可能是造成碳同位素数据缺失的原因。

#### 4.2 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 协变关系及其环境指示意义

通常情况下,同一剖面保存的无机碳与有机碳同位素具有耦合关系,被认为记录了原始的表层海水信息(Meyer *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2023)。但是当二者变化不一致、表现出解耦现象时,往往被解释为成岩作用改造、区域性因素对  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  的影响等等(Jiang *et al.*, 2012; Oehlert and Suart, 2014)。本次研究钻孔 ZK001 和钻孔 ZK0701 中的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  与  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  在灯影组顶部至朱家箐组底部均可见一致的负偏,但在朱家箐组中上部出现  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  与  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  解耦(图 2、图 3)。该解耦现象目前在寒武纪早期为数不多的报道中,被解释成有机碳的再矿化造成的(Oehlert and Suart, 2014; Li *et al.*, 2022)。相较而言,碳同位素解耦现象在新元古代更为普遍,目前较为流行的解释有两种:一种假说认为新元古代的海水中存在超大型的溶解有机碳(DOC)储库,DOC 的间歇性氧化会导致  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  的负偏,而  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  基本保持不变(Rothman *et al.*, 2003; Johnston *et al.*, 2012a; Yang *et al.*, 2021);另一种假说认为受到早期陆源输入和后期成岩作用如大气降水的影响

(Knauth and Kennedy, 2009)、埋藏成岩作用(Derry, 2010)等导致  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  与  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  解耦。另外,也有学者提出光合作用产生的有机质和外来物源的混合模型,来解释碳同位素耦合和解耦的现象(Johnston *et al.*, 2012b)。

在寒武纪早期,全球多地的表层海水处于氧化状态,深层海水还处于广泛缺氧状态(Sahoo *et al.*, 2012; Och *et al.*, 2013)。羊场聚磷盆地西部靠近陆源,海水较浅,不利于磷酸盐的沉积,中部较为平缓的高地阻挡了富磷酸盐的上升海流向南流动,且当时强烈的风化作用和  $\text{CO}_2$  消耗引发气候急速变冷,导致温盐环流增强引起底水上涌(Zhang *et al.*, 2021)。上涌的缺氧海水将深海中的磷酸根、贫  $^{13}\text{C}$  的海水以及海洋中的溶解有机碳储库(DOC)(Jiang *et al.*, 2012),与含磷的陆源碎屑和海洋中富含磷质的浮游生物等物质在海底混合后共同形成海底淤泥(图 7a)。在漫长的成岩过程中,这些淤泥给磷矿沉淀提供了物源(图 7b)(岳维好等, 2022)。该时期  $\Delta\text{C}_{\text{carb-org}}$  值较大说明  $\text{CO}_2$  浓度较高,在海水中氧化还原作用比较强烈,因此沉积的碳酸盐岩中具有较高  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  值、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值(Gao *et al.*, 2023; 汪瑾等, 2023)。在羊场磷矿中灯影组至朱家箐组底部,  $\Delta\text{C}_{\text{carb-org}}$  在 28.8‰附近波动,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  与  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  耦合;然而,在朱家箐组下部  $\Delta\text{C}_{\text{carb-org}}$  平均值开始显著升高(约为 32.7‰),表明此时的碳循环应该不是受底水上涌带来的 DOC 储库部分氧化的影响,因为该过程会导致溶解无机碳 DIC 同位素组成下降从而使  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  负偏,DOC 储库的存在缓冲了  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  变化(Smith *et al.*, 2016; 石炜等, 2017),导致  $\Delta\text{C}_{\text{carb-org}}$  值降低。相反,本次研究的两个钻孔(ZK001 和 ZK0701)的  $\Delta\text{C}_{\text{carb-org}}$  非降反升。尽管成岩作用也可能导致  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  的正偏(Jiang *et al.*, 2012),但笔者更偏向于认为  $\Delta\text{C}_{\text{carb-org}}$  升高是由于海洋初级生产力增强或者有机碳埋藏增加,促使海洋  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  正偏(图 7b),因为朱家箐组出现总有机碳含量(TOC)显著增加(Wang *et al.*, 2015)。在晚奥陶世内也发生了类似的过程,Longman 等(2021)认为这可能与火山活动有关,因为火山灰的淋滤会引起磷供应增强,从而影响了海洋中的碳循环。随后,从朱家箐组上部开始  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  值呈现正偏移,  $\Delta\text{C}_{\text{carb-org}}$  平均值降低到 29.61‰,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  与  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  恢复为耦合关系,同时伴随着 TOC 的明显降低(图 2、图 3、图 7c),推测其原因是海洋中逐渐重新变为以氧化状态为主,有机

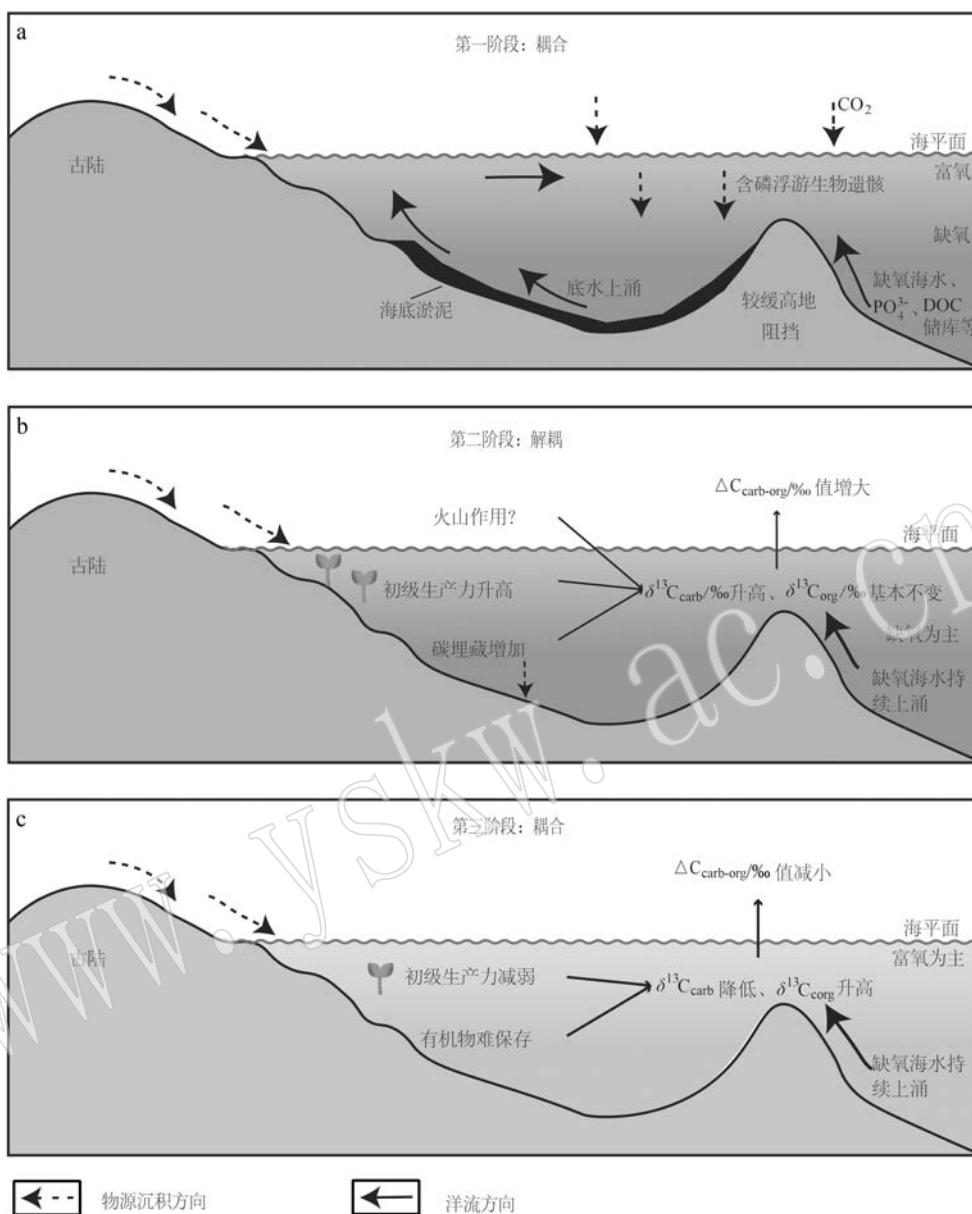


图 7 羊场磷矿的  $\delta^{13}C_{carb}$  和  $\delta^{13}C_{org}$  协变模式图(修改自岳维好等, 2022)

Fig. 7 Covariant patterns of  $\delta^{13}C_{carb}$  and  $\delta^{13}C_{org}$  in Yangchang phosphate deposit(modified from Yue Weihao *et al.* , 2022)

物在氧化条件下难以保存。

## 5 结论

(1) 羊场磷矿钻孔岩芯在灯影组顶部至朱家箐组底部有一次明显的碳同位素负偏,通过与华南寒武系碳同位素综合曲线进行对比表明,笔者认为此次碳同位素负偏可与寒武系的 BACE 负异常事件对应,可能是因为有机碳库被氧化造成的。

(2) 在本次研究的 3 个钻孔中都未发现幅度大

于 4‰ 的  $\delta^{13}C_{carb}$  正漂移(ZHUCE),结合钻孔样品观察结果,认为该地区在牛蹄塘组和朱家箐组之间可能存在沉积间断。由于 3 个钻孔中的含磷矿层均位于碳同位素负偏移之上,即朱家箐组中下部,通过与华南地区碳同位素综合曲线的对比,认为云南羊场磷矿的产出时代为寒武纪纽芬兰世幸运期。

(3) 通过对钻孔 ZK001 和钻孔 ZK0701 中  $\delta^{13}C_{carb}$  和  $\delta^{13}C_{org}$  对比研究发现, $\delta^{13}C_{carb}$  和  $\delta^{13}C_{org}$  在灯影组顶部至朱家箐组底部、朱家箐组顶部至明心寺组内耦合变化,但在朱家箐组中部表现出解耦,该

解耦现象是因为初级生产力增强或者有机碳埋藏增加导致的,而不是溶解有机碳储库的再氧化所致。

**致谢** 本研究得到了云南大学冯卓研究员、南京大学张飞飞教授等专家,以及云南省地质调查院杨淑胜、董涛、王枫、黄太平等各位领导及合作者的支持。对本稿的两名匿名评审专家和期刊编辑一并表示感谢。

## References

- Cook P J. 1992. Phosphogenesis around the Proterozoic-Phanerozoic transition[J]. *Journal of the Geological Society*, 149(4): 615~620.
- Derry L A. 2010. A burial diagenesis origin for the Ediacaran Shuram-Wonoka carbon isotope anomaly[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 294(1~2): 152~162.
- Gao L, Yang R D, Wu T, *et al.* 2023. Studies on geochemical characteristics and biomineralization of Cambrian phosphorites, Zhijin, Guizhou Province, China[J]. *PLoS ONE*, 18(2): e0281671.
- Halverson G P, Hoffman P F, Schrag D P, *et al.* 2005. Toward a Neoproterozoic composite carbon-isotope record[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 117(9): 1 181.
- Jiang G Q, Wang X Q, Shi X Y, *et al.* 2012. The origin of decoupled carbonate and organic carbon isotope signatures in the Early Cambrian (ca. 542~520 Ma) Yangtze platform[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 317: 96~110.
- Johnston D T, MacDonald F A, Gill B C, *et al.* 2012a. Uncovering the Neoproterozoic carbon cycle[J]. *Nature*, 483(7 389): 320~323.
- Johnston, Poulton D T, Goldberg S W, *et al.* 2012b. Late Ediacaran redox stability and metazoan evolution[J]. *Earth and Planetary Science Letters: A Letter Journal Devoted to the Development in Time of the Earth and Planetary System*, 335-336: 25~35.
- Knauth L P and Kennedy M J. 2009. Adelaide research and scholarship: The Late Precambrian greening of the earth[J]. *Nature Publishing Formation*, 460(7 256): 728~732.
- Kouchinsky A, Bengtson S, Pavlov V, *et al.* 2007. Carbon isotope stratigraphy of the Precambrian-Cambrian Sukharikha River section, northwestern Siberian platform[J]. *Geological Magazine*, 144(4): 609~618.
- Lan Z W, Li X H, Chu X L, *et al.* 2017. SIMS U-Pb zircon ages and Ni-Mo-PGE geochemistry of the lower Cambrian Niutitang Formation in South China: Constraints on Ni-Mo-PGE mineralization and stratigraphic correlations[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 137: 141~162.
- Li D, Ling H F, Jiang S Y, *et al.* 2009. New carbon isotope stratigraphy of the Ediacaran-Cambrian boundary interval from SW China: Implications for global correlation[J]. *Geological Magazine*, 146(4): 465~484.
- Li Y, Wang S B, Xia J, *et al.* 2022. Geochemical characteristics and their marine environmental and organic source implications for the Lower Cambrian shales in Guizhou Province, South China[J]. *Lithosphere*, (Special 9): 5210610.
- Longman J, Mills B J W, Manners H R, *et al.* 2021. Late Ordovician climate change and extinctions driven by elevated volcanic nutrient supply[J]. *Nature Geoscience*, 14: 924~929.
- Lü Jun, Rang Hao, Guo Yang, *et al.* 2021. The geological feature and a preliminary analysis of sedimentary environment of Yangchang deposit in Zhenxiong, Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 40(1): 76~82 (in Chinese with English abstract).
- Meyer K M, Yu M, Lehmann D, *et al.* 2013. Constraints on Early Triassic carbon cycle dynamics from paired organic and inorganic carbon isotope records[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 361: 429~435.
- Mi Yunchuan, Huang Taiping, Zhou Qian, *et al.* 2021. The sedimentary environment and resource potential of the newly discovered Yangchang super-large phosphate deposit in the Zhenxiong area, Yunnan[J]. *Geology and Exploration*, 57(4): 808~824 (in Chinese with English abstract).
- Och L M, Shields-Zhou G A, Poulton S W, *et al.* 2013. Redox changes in Early Cambrian black shales at Xiaotan section, Yunnan Province, South China[J]. *Precambrian Research*, 225: 166~189.
- Oehlert A M and Swart P K. 2014. Interpreting carbonate and organic carbon isotope covariance in the sedimentary record[J]. *Nature Communications*, 5: 4672.
- Reis A, Erhardt A M, McClue M M, *et al.* 2019. Evaluating the effects of diagenesis on the  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  compositions of carbonates in a mud-rich depositional environment: A case study from the Midland Basin, USA[J]. *Chemical Geology*, 524: 196~212.
- Rothman D H, Hayes J M and Summons R E. 2003. Dynamics of the Neoproterozoic carbon cycle[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(14): 8 124~8 129.

- Sahoo S K, Planavsky N J, Kendall B, *et al.* 2012. Ocean oxygenation in the wake of the Marinoan glaciation[J]. *Nature*, 489(7 417): 546~549.
- Saltzman M R, Ripperdan R L, Brasier M D, *et al.* 2000. A global carbon isotope excursion (SPICE) during the Late Cambrian: Relation to trilobite extinctions, organic-matter burial and sea level [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 162(3~4): 211~223.
- Shi Wei, Li Chao and Thomas J. 2017. Quantitative model evaluation of organic carbon oxidation hypotheses for the Ediacaran Shuram carbon isotopic excursion[J]. *Science China*, 47(12): 1 436~1 446 (in Chinese with English abstract).
- Smith E F, MacDonald F A, Petach T A, *et al.* 2016. Integrated stratigraphic, geochemical, and paleontological late Ediacaran to early Cambrian records from southwestern Mongolia[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 128(5~6): 1 056~1 056.
- Sun Y, Qing O Y, Lang X L, *et al.* 2023. Global sea-level fall triggered Ediacaran-Cambrian unconformity in North China craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 622: 118411.
- Topper T, Betts M J, Dorjnamjaa D, *et al.* 2022. Locating the BACE of the Cambrian: Bayan Gol in southwestern Mongolia and global correlation of the Ediacaran-Cambrian boundary[J]. *Earth-Science Reviews*, 229: 104017.
- Wang Jin, Lin Yi-bo and Yang Tao. 2023. Evolution of environmental oxidation and reduction of seawater in Three Gorges area in Early Cambrian: Evidence from decoupled carbon isotopes in Luojiacun section [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 45(1): 157~167 (in Chinese with English abstract)
- Wang S F, Zou C N, Dong D Z, *et al.* 2015. Multiple controls on the paleoenvironment of the Early Cambrian marine black shales in the Sichuan Basin, SW China: Geochemical and organic carbon isotopic evidence[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 66: 660~672.
- Xiong Yiwei, Pan Bin, Lü Miao, *et al.* 2021. A restudy of carbon isotope chemostratigraphy of the Ediacaran-Cambrian transition in southern Sichuan Province[J]. *Journal of Stratigraphy*, 46(3): 230~244 (in Chinese with English abstract).
- Xue Ke and Zhang Runyu. 2019. Advances of researches on the distribution and metallogenic characteristics of phosphorous deposits in China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 39(1): 7~14 (in Chinese with English abstract).
- Yang H Y, Xiao J F, Xia Y, *et al.* 2021. Phosphorite generative processes around the Precambrian-Cambrian boundary in South China: An integrated study of Mo and phosphate O isotopic compositions[J]. *Geoscience Frontiers*, 12(5): 101187.
- Yuan C S, Liu S G, Chen J T, *et al.* 2022. Zinc isotopic evidence for enhanced continental weathering and organic carbon burial during the late Cambrian SPICE event[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 608: 111302.
- Yue Weihao, Huang Yanhua and Dao Tinghong. 2022. Geological characteristics and resource potential of the super-large high-quality phosphorite deposit of the Yangchang in Zhenxiang County, Yunnan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 41(5): 846~856 (in Chinese with English abstract).
- Zhang G J, Chen D Z, Huang K J, *et al.* 2021. Dramatic attenuation of continental weathering during the Ediacaran-Cambrian transition: Implications for the climatic-oceanic-biological co-evolution [J]. *Global and Planetary Change*, 203: 103518.
- Zhang X L and Cui L H. 2016. Oxygen requirements for the Cambrian explosion[J]. *Journal of Earth Science*, 27(2): 187~195.
- Zhang Xingliang. 2021. Cambrian explosion: Past, present, and future [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 60(1): 10~24 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y G, Yang T, Newton R J, *et al.* 2023. Seawater carbon and strontium isotope variations in the eastern Tarim Basin during the Cambrian: Implications for connection with the open ocean [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 253: 105702.
- Zhu M Y, Babcock L E and Peng S C. 2006. Advances in Cambrian stratigraphy and paleontology: Integrating correlation techniques, paleobiology, taphonomy and paleoenvironmental reconstruction [J]. *Palaeoworld*, 15(3~4): 217~222.
- Zhu M Y, Li G, Zhang J, *et al.* 2001. Early Cambrian stratigraphy of East Yunnan, southwestern China: A synthesis[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 40(Sup. ): 4~39.
- Zhu M Y, Strauss H and Shields G A. 2007. From snowball earth to the Cambrian bioradiation: Calibration of Ediacaran-Cambrian earth history in South China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 254(1~2): 1~6.
- Zhu Maoyan, Sun Zhixin, Yang Aihua, *et al.* 2021. Lithostratigraphic subdivision and correlation of the Cambrian in China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 45(3): 223~249 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Maoyan, Yang Aihua, Yuan Jinliang, *et al.* 2019. Cambrian integrative stratigraphy and timescale of China [J]. *Science China Earth Sciences*, 49(1): 26~65 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 吕俊, 让昊, 郭阳, 等. 2021. 云南镇雄县羊场磷矿地质特征及沉积环境浅析[J]. 云南地质, 40(1): 76~82.
- 米云川, 黄太平, 周骞, 等. 2021. 云南镇雄地区新发现羊场超大型磷矿沉积环境及资源潜力分析[J]. 地质与勘探, 57(4): 808~824.
- 石炜, 李超, Thomas J. 2017. 埃迪卡拉纪 Shuram 碳同位素负偏事件有机碳氧化假说的定量模型评估[J]. 中国科学: 地球科学, 47(12): 1436~1446.
- 汪瑾, 齐祎勃, 杨涛. 2023. 三峡地区早寒武世海水氧化还原环境的变化——来自罗家村剖面碳同位素解耦的证据[J]. 石油实验地质, 45(1): 157~167.
- 熊轶伟, 潘兵, 吕苗, 等. 2022. 四川南部埃迪卡拉纪-寒武纪过渡时期碳同位素地层学再研究[J]. 地层学杂志, 46(3): 230~244.
- 薛珂, 张润宇. 2019. 中国磷矿资源分布及其成矿特征研究进展[J]. 矿物学报, 39(1): 7~14.
- 岳维好, 黄艳华, 刀听红. 2022. 上扬子西南缘云南镇雄县羊场超大型优质磷矿地质特征及资源潜力[J]. 地质通报, 41(5): 846~856.
- 张兴亮. 2021. 寒武纪大爆发的过去、现在与未来[J]. 古生物学报, 60(1): 10~24.
- 朱茂炎, 孙智新, 杨爱华, 等. 2021. 中国寒武纪岩石地层划分和对比[J]. 地层学杂志, 45(3): 223~249.
- 朱茂炎, 杨爱华, 袁金良, 等. 2019. 中国寒武纪综合地层和时间框架[J]. 中国科学: 地球科学, 49(1): 26~65.

www.yskw.ac.cn