

鄂西—黔南地区下寒武统页岩旋回地层学研究

魏小松¹, 严德天¹, 龚银², 牛杏³, 梁万乐¹, 伏海蛟¹, 刘紫璇¹,
杨向荣³, 张宝¹

1.中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室,武汉 430074

2.湖北地质局第七大队,湖北宜昌 443000

3.长江大学地球科学学院,武汉 430100

摘要 【目的】鄂西—黔南地区下寒武统富有机质页岩层系是页岩气勘探的重要目标,查明不同地区富有机质页岩层段的等时地层关系及其成因已成为页岩气勘探的关键问题。【方法】通过对鄂西 ND1 井及黔南 HY1 井下寒武统测井自然伽马数据的旋回地层学分析,识别出下寒武统主要的天文周期,以文献已报道的锆石年龄作为锚点建立了两口井的天文年代标尺,并基于沉积噪音模型恢复了两口井下寒武统时期的相对海平面变化。【结果】ND1 井牛蹄塘组 36 m 和 9 m 的沉积旋回及 HY1 井 16.6 m 和 4 m 的沉积旋回代表了轨道周期 405 kyr 和 100 kyr 偏心率;ND1 井牛蹄塘组和 HY1 井九门冲组持续时间分别为 3.3 Myr 和 2.6 Myr,其年龄区间分别处于 535.4±1.7 Ma~536.82±1.7 Ma 和 535.2±1.7 Ma~537.84±1.7 Ma。经过对比分析,两口井海平面变化对应于 1.2 Myr 旋回和两个三级层序(SQ1 和 SQ2)。将下寒武统富有机质页岩有机碳含量(TOC)和 405 kyr 旋回滤波及海平面变化曲线对比,结果显示 TOC 高值段对应于 405 kyr 旋回最大值,而 ND1 井 TOC 低值段对应于两个 405 kyr 旋回之间的低值。此外,TOC 高值段既对应于海平面较高时期,也对应于海平面较低时期。【结论】由于太阳系的混沌行为,无法准确预测寒武纪早期理论轨道偏心率对富有机质页岩驱动的机制。假设偏心率最大值和有机碳含量最大值对应,则在更长的时间里强季节性变化在某种程度上触发了黑色页岩的富集。此外,相对海平面变化和有机碳含量对比表明海平面变化和有机质富集不具有因果关系。

关键词 牛蹄塘组;九门冲组;轨道驱动;偏心率;沉积噪音模型

第一作者简介 魏小松,男,1992年出生,博士,旋回地层学,E-mail:weixiaoson_g@163.com

通信作者 严德天,男,教授,博士生导师,沉积学,E-mail:yandetian@cug.edu.cn

中图分类号 P539 **文献标志码** A

0 引言

新元古代晚期—早古生代早期是华南克拉通地质演化的关键阶段^[1]。这一时期,发生了包括罗迪尼亚超大陆裂解^[2-3]、冈瓦纳泛大陆聚合^[4]、全球冰川形成与消退^[5]、寒武纪生命大爆发等一系列重大地质事件。寒武纪早期,由于寒武纪生命大爆发为有机质富集和烃源岩形成提供了物质条件,因此在全球多个地区广泛发育烃源岩^[1]。华南上扬子地区下寒武统地层普遍沉积了一套黑色页岩及硅质岩互层层系,在空间上呈现北东—南西向狭长型带状展布^[6],从云南地区延伸至浙江一带。目前,已在川西南筇竹寺组、云南东部麦地坪组、湘鄂西

—黔东南地区牛蹄塘组及黔南黄平九门冲组等多个地区获得工业页岩气流,充分表明上扬子地区下寒武统具有良好的页岩气勘探潜力^[7]。

查明不同地区富有机质页岩层段的等时地层关系及其成因已成为页岩气勘探的关键问题^[7]。在页岩层系中,岩相、凝缩段、沉积旋回及其叠加样式、典型岩性标志层及自然伽马能谱测井曲线可作为地层划分的重要依据^[7-12],从而建立页岩层系地层格架。然而,海相地层页岩沉积一般较连续,在无明显响应标志和明显侵蚀作用面的地层,识别层序界面并建立层序地层格架极其困难。除此之外,华南上扬子不同地区下寒武统地层序列时空变化复杂,岩石地层名称存在较大差异^[13],不同地区下寒武统地层横向对比还未形成统一的认识,因此,基于层序地层及重要标志层的等时地层对比存在很大限制。

对火山碎屑层或火山灰层开展放射性锆石年代学分析可为地层提供了高精度年龄锚点,但其孤立应用具有严重的局限性。原因在于,很少有研究可以确定岩石所处地层真正的年龄^[14]。另外,地层中沉积的火山碎屑层及火山灰层有限,因此难以获得多个层位的锆石年龄来对沉积地层进行综合约束。近年来,放射性同位素年代学和天文年代学相结合的方法在年代地层研究中得到广泛的应用。该方法为地质历史时期的沉积地层提供高分辨率且连续的年代标尺,已成为约束地质年代的精确工具^[15]。旋回地层学利用沉积地层的旋回性(沉积韵律)作为地质计时器,这些周期性的旋回与地球轨道参数变化有关。地球轨道参数(偏心率、斜率和岁差)的周期性变化引起地球的季节性变化和固定纬度的太阳辐射量大小,从而影响了地球表层沉积过程的变化,并在沉积记录中体现为周期性的旋回特征^[16]。例如,北纬 65°冰期旋回是由轨道驱动引起的太阳辐射量大小控制的^[17]。

然而,在大于 50 Ma 的地质历史时期,太阳系的混沌行为导致轨道参数配置(即:天文周期)表现出很大的不确定性^[18],这对斜率和岁差具有较大影响。由于长偏心率(405 kyr)是木星和金星之间相互作用引起的(g_2-g_5),且木星的质量足够大,因此,长偏心率(405kyr)在地质历史时期保持相对稳定的状态^[18]。在中生代及古生代地层中,长偏心率旋回已被频繁用作天文调谐的目标曲线(即:调谐到 405 kyr 偏心率周期)。例如:Zhao *et al.*^[19]在寒武纪地层识别出明显的天文轨道周期,并建立了 16 Myr 长的天文年代标尺。周杨等^[20]和 Zhang *et al.*^[21]对川南下寒武统筇竹寺组富有机质页岩层系开展了旋回地层学分析及等时地层对比的研究。然而,目前对鄂西—黔南地区下寒武统富有机质页岩层系的旋回地层学及等时地层对比分析缺乏研究。因此,查明该地区页岩层系等时地层关系,开展旋回地层学分析具有重要意义。

本研究拟对鄂西下寒武统牛蹄塘组及黔南下寒武统九门冲组地层开展旋回地层学研究。

分别以鄂西及黔南地区两口工业钻井测井伽马曲线作为替代指标，识别出主要的天文周期，建立“浮动”天文年代标尺，基于层序地层对比及已经报道的绝对年龄，标定建立等时地层格架。其次，基于沉积噪音模型方法重建下寒武统目的层段海平面变化并进行对比分析，最终揭示牛蹄塘组和九门冲组富有机质黑色页岩可能的成因。

1 地质背景

华南板块在寒武纪位于接近赤道的位置（图 1a），由东南的华夏板块和西北的扬子板块组成（图 1b）。扬子克拉通形成于华夏地块和扬子地块的碰撞作用，在埃迪卡拉—早寒武世形成了被动大陆边缘盆地^[24-25]。由于差异沉降作用，扬子克拉通内发育多个洼地，东南方向为大规模开放盆地^[25]。由西北向东南依次为浅水碳酸盐台地、局限潟湖盆地、台地边缘和斜坡—深水盆地区^[1,6]。早寒武世台—盆转换带海底热液活动频发，大规模海侵导致水体进一步缺氧，湘鄂西—黔北—黔南地区发育富有机质炭质泥岩、页岩和硅质岩^[26-28]。随着海平面下降以及碳酸盐岩台地的形成，区域上开始发育大规模碳酸盐岩沉积^[26]。根据野外露头剖面及岩性特征，下寒武统顶部发育的碳酸盐岩段及震旦系顶部发育的灰岩段已被当做两套区域性标志层，用于富有机质页岩层系区域性的对比。

本研究选取的 ND1 井位于湖北省宜昌市聂佳河镇，属于碳酸盐台地相（图 1b）。沉积地层自下而上分别为震旦纪灯影组，下寒武统牛蹄塘组、石牌组、天河板组、石龙洞组（图 1c、表 1）。下寒武统牛蹄塘组下段沉积为黑色及灰色含碳页岩，与下伏灯影组白云岩成平行不整合接触^[28]。HY1 井位于贵州省贵阳市东部地区，属于斜坡相（图 1b）。沉积地层自下而上分别为上震旦统灯影组、下寒武统九门冲组、杷榔—变马冲组、清虚洞组，中寒武统高台组，上寒武统娄山关组（图 1c、表 1）。下寒武统九门冲组沉积以深灰—黑灰炭质泥岩、硅质泥岩、硅质岩为主（图 1）。

刘忠宝等^[7]对上扬子地区下寒武统地层进行了分区和对比，将上扬子地区下寒武统划分为 8 个三级层序，其中 HY1 井下寒武统地层划分为两个层序（SQ1 和 SQ2）（图 2），但 SQ1 和 SQ2 存在穿时性，不同地区缺失程度和沉积特征存在明显差异。在层序地层对比中，HY1 井 SQ2 层序和 JY1 井筲竹寺组底部（或麦地坪组）地层（SQ2 层序）对应，但 JY1 井底部缺失 SQ1 层序（图 2）。周杨等^[20]对 JY1 井及肖滩剖面岩石地层、古生物地层及年代地层进行了对比。JY1 井麦地坪组白云岩可与肖滩剖面朱家箐组含磷灰岩对比。

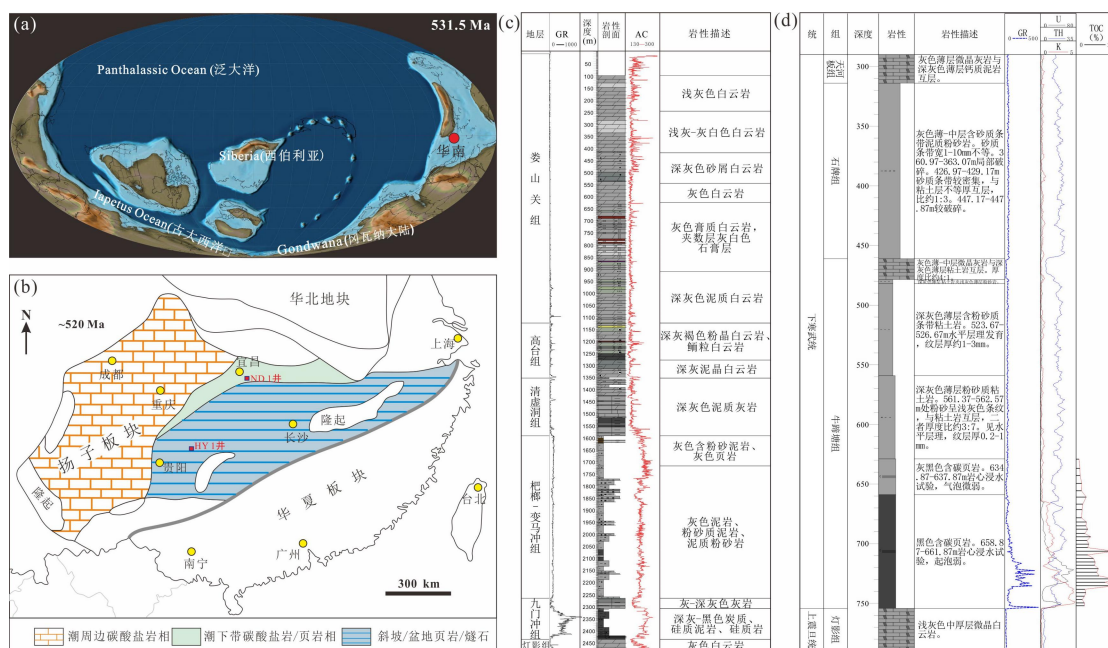


图1 华南扬子地区下寒武统古地理及地层柱状图

(a) 早古生代 (531.5 Ma) 古地理图及华南陆块位置 (据文献[22]修改); (b) 华南板块古地理图 (~520 Ma) [23] 及 HY1 井[29] 和 ND1 井位置[28]; (c, d) HY1 井和 ND1 井地层柱状图

Fig.1 Paleogeographic map and stratigraphic column of the Lower Cambrian in the Yangtze Block, South China (a) paleogeographic map of the Early Paleozoic (531.5 Ma) and location of the South China Block; (b) paleogeographic map of the South China Block and locations of the wells HY1 and ND1; (c, d) stratigraphic columns of the wells HY1 and ND1

表1 华南上扬子地区下寒武统地层对比 (据文献[7]修改)

Table 1 Stratigraphic correlation of the Lower Cambrian in the Upper Yangtze Block, South China (modified from reference [7])

统	阶	地 层						
		川西南	川东南、黔北 —黔中	川北南江	黔东南皋	黔南黄平	川北城口、鄂 西—渝东	鄂西宜昌
中寒武统	毛庄阶	陡坡寺组	高台组	陡坡寺组	高台组	高台组	高台组	
	龙王庙组	龙王庙组	清虚洞组	孔明洞组	清虚洞组	石龙洞组	石龙洞组	
下寒武统	沧浪铺组	沧浪铺组	金顶山组	阎王碛组	杷榔组—变马冲组	天河板组	天河板组	
			明心寺组					仙女洞组
	筲竹寺组	筲竹寺组	牛蹄塘组	郭家坝组		九门冲组	水井沱组 (牛蹄塘组)	水井沱组 (牛蹄塘组)
				郭家坝组				
梅树村阶	麦地坪组		宽家铺组	老堡组				
上震旦统		灯影组	灯影组	灯影组	灯影组	灯影组	灯影组	

ND1 井下寒武统牛蹄塘组顶部发育一套微晶灰岩和深灰色薄层黏土岩互层, 其上覆地层石牌组主要以泥质粉砂岩沉积为主, 而 HY1 井九门冲组顶部同样发育一套灰色—深灰色灰岩, 与 JY1 井麦地坪组顶部灰岩对应, 其上覆地层杷榔—变马冲组以灰色泥岩、粉砂质

泥岩及泥质粉砂岩沉积为主（图 1， 2）。因此，九门冲组顶部灰岩和牛蹄塘组顶部灰岩层可以作为横向对比标志层。又由于 ND1 井牛蹄塘组和 HY1 井九门冲组页岩和底部灯影组白云岩接触，因此 ND1 井牛蹄塘组可与 HY1 井九门冲组进行层序对比。依据岩性变化在 ND1 井牛蹄塘组内部可划分出两个沉积旋回，对应于层序 SQ1 和 SQ2（图 2）。

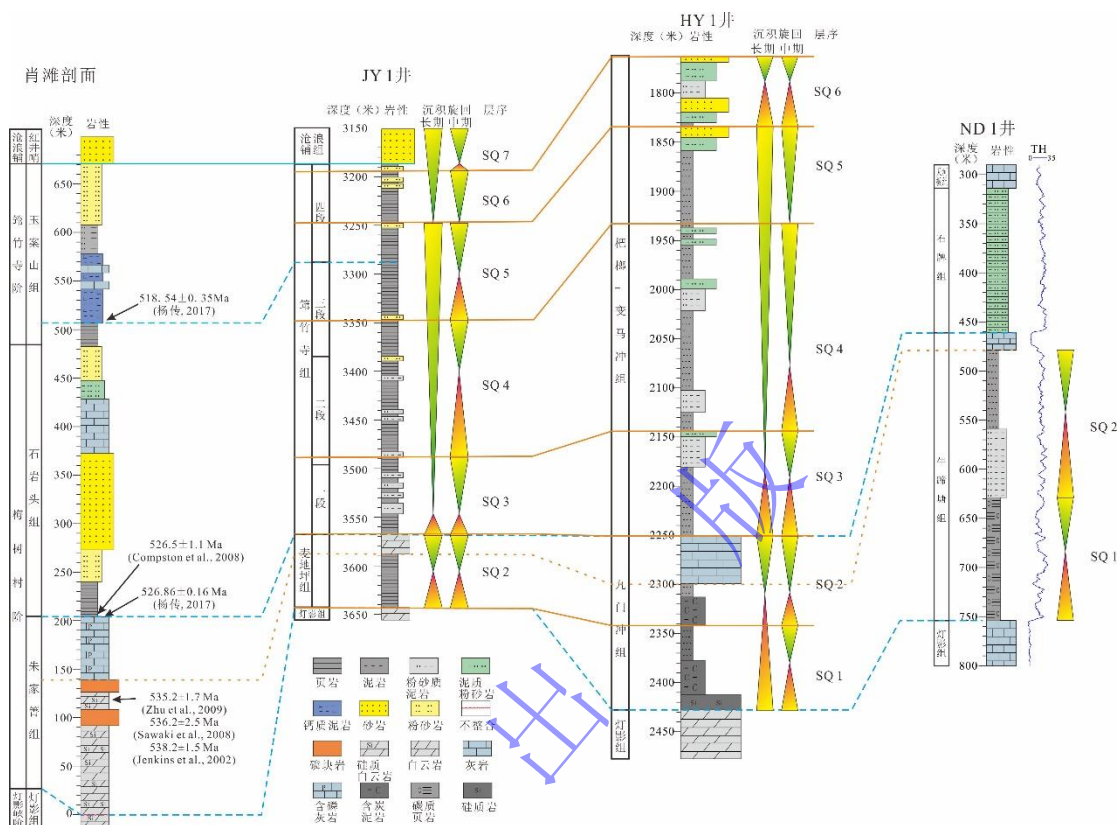


图 2 肖滩剖面及 JY1、HY1 和 ND1 井下寒武统地层对比

Fig.2 Stratigraphic correlation of the Lower Cambrian among the Xiaotan section, JY1, HY1 and ND1 wells

2 数据及方法

2.1 数据

研究选取 HY1 井和 ND1 井自然伽马能谱测井（GR）数据进行旋回地层学分析。HY1 井九门冲组选取 2 310~2 420 m 的深度段，其分辨率（采样间距）为 0.125 m。ND1 井牛蹄塘组选取 481~750 m 的深度段，其分辨率为 0.125 m。此外，HY1 井总有机碳（TOC）数据和 ND1 井地球化学数据（V、Cr 和 Ni）用于综合对比分析。HY1 井 TOC 数据来源于文献[29]。ND1 井 TOC 数据在中国地质大学（武汉）教育部重点实验室完成。步骤如下：（1）将岩心样品研磨成 200 目，加入稀盐酸溶液进行前处理；（2）残余样品中称取 1g 粉末样置于 5 mL 离心管，加入 2 mL 浓度为 4 mol/L 的 HCl 溶液摇匀混合，静置 12 h 直至无气泡；（3）第一步用盐酸去除无机碳酸盐后，多次加入去离子水进行离心分离直至取上清液的 pH 变为

中性。然后将处理的样品用冷冻干燥机干燥；（4）称取 20 mg 样品用锡纸包好，用镊子将通过工具压实折叠包好的样品放入元素分析仪进行测试。

ND1 井地球化学数据（V、Cr 和 Ni 微量元素）测试在武汉上谱科技有限责任公司利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成。处理步骤如下：（1）将岩心样品磨成 200 目粉末状置于 105 °C 烘干箱 12 h；（2）取 50 mg 粉末样品放置于高压密闭的 Teflon 溶样器中，分别先后依次缓慢加入 1.5 mL 的高纯氢氟酸（HNO₃）和高纯硝酸；（3）将其密封后置于烘干箱，拧紧后置于 190 °C 恒温烘干 24 h 以上；（4）待溶样冷却，开盖后置于 140 °C 电热板蒸干，然后加入 1 mL HNO₃ 并再次蒸干；（5）加入 1 mL 高纯氢氟酸、1 mL MQ 水和 1 mL 内标 In（浓度为 1×10^{-6} ），再次将 Teflon 溶样器的放入钢套，拧紧后置于 190 °C 烘箱中加热 12 h 以上；（6）将溶液转入聚乙烯料瓶中，并用 2% HNO₃ 稀释至 100 g 以备 ICP-MS 测试。

自然伽马测井数据作为一种理想的古气候替代指标，已被广泛用于旋回地层学的研究^[30-31]。自然伽马能谱测量岩石中放射性物质（Th、U、K）在衰变过程中放射出的自然伽马辐射的强度。放射性元素易富集在黏土矿物和有机质中。泥页岩中黏土矿物和有机质含量高，砂砾岩及碳酸盐岩中黏土矿物含量较少，因此，泥页岩一般具有较高的 GR 值^[32-33]。GR 值变化反映了岩性的变化，岩性变化则反映了风化强度、降雨及河流输入能力^[32-33]，这些均与古气候变化关系密切。

2.2 时频分析方法

本研究采用多个旋回地层学方法，包括多窗谱估计（multitaper method, MTM）频谱分析、快速傅里叶变换（Fast Fourier Transform）滑动窗口频谱分析、高斯带通滤波、相关系数（correlation coefficient, COCO）和演化的相关系数（evolutionary correlation coefficient, eCOCO）分析。在频谱分析之前，首先对等间距的测井曲线进行去趋势化（detrended）处理，以去除长期趋势^[34]。对去趋势后的测井 GR 曲线开展 MTM 频谱分析、快速傅里叶变换及沉积速率估算，以确定潜在的天文周期。基于蒙特卡罗模拟的 COCO 和 eCOCO 分析可以给出最优的沉积速率及其随深度的变化。

在边缘海环境中，气候替代指标记录的动态非轨道信号（即“噪音”）影响了气候和相对海平面变化，这种沉积噪音可归因于风暴、潮汐、生物扰动等因素^[35]。基于此，Li *et al.*^[35]开发了沉积噪音模型方法（dynamic noise after orbital tuning, DYNOT 和 lag-1 autocorrelation coefficient, ρ_1 ）分析，用于模拟相对海平面变化。一般情况下，高海平面对应于 DYNOT 低值和 ρ_1 高值，反之亦然。以上所有方法都在 Acycle v2.4.1^[34]开源软件上运行。

3 结果

3.1 深度域频谱分析

HY1 井频谱分析显示超过 99%置信度的峰值有 16.6 m, 4 m, 2.32 m, 1.78 m 和 1.43 m, 且 16.6 m 和 4 m 的沉积旋回比值约为 4:1 (图 3a)。快速傅里叶变化图谱显示在 2 390~2 400 m 和 2 310~2 365 m 深度段 16.6 m 的波长信号较强, 而在 2 365~2 390 m 深度段 4 m 的波长信号强 (图 3b)。ND1 井频谱分析显示超过 99%置信度的峰值有 36 m, 9 m, 3.3 m, 1.9 m, 1.5 m 和 1.25 m, 且 36 m 和 9 m 的沉积旋回比值为 4:1, 表明 36 m 和 9 m 的沉积旋回可能为 405 千年(kyr)和 100 kyr 偏心率(图 3c)。快速傅里叶变换图谱显示 36 m 的波长在 480~750 m 间隔信号都很强, 而 9 m 的波长仅在 480~550 m 间隔具有强信号 (图 3d)。

对 HY1 井开展 COCO 和 eCOCO 分析, 结果显示了三个最佳沉积速率: 4.1 cm/kyr, 13.5 cm/kyr 和 16.5 cm/kyr (图 4)。由于 4.1 cm/kyr 对应的天文周期个数为 7, 且 eCOCO 图谱显示整个层段约 4.1 cm/kyr 的强信号, 因此, HY1 井最佳沉积速率为 4.1 cm/kyr。对应地, 16.6 m, 4 m, 2.32 m, 1.78 m 和 1.43 m 的沉积旋回的持续时间大致为 405 kyr, 98 kyr, 57 kyr, 43 kyr 和 35 kyr。同样地, 对 ND1 井开展 COCO 和 eCOCO 分析, 结果显示最佳沉积速率为 9 和 12 cm/kyr (图 5)。由于 eCOCO 图谱中显示的沉积速率大部分均值为 9 cm/kyr, 因此, ND1 井 36 m, 9 m, 3.3 m, 1.9 m 和 1.5 m 的沉积旋回持续时间大致为 405 kyr, 100 kyr, 36 kyr, 21 kyr 和 16.6 kyr。

由于太阳系行星之间的混沌行为, 寒武纪早期的天文轨道周期斜率和岁差更接近, 部分周期可能出现叠置难以识别^[20], 而 405 kyr 长偏心率周期在地质历史时期保持稳定。因此, HY1 井 16.6 m 和 ND1 井 36 m 的沉积旋回代表了 405 千年长偏心率周期。按照 Waltham^[36] 的天文周期方案, 520 Ma 左右的天文周期为 405 kyr, 131 kyr, 95 kyr, 36.4 kyr, 28.2 kyr, 20.4 kyr, 19.4 kyr 及 16.8 kyr。因此, HY1 井 4 m 和 1.43 m 的沉积旋回分别代表了短偏心率周期和斜率周期; ND1 井 9 m 和 3.3 m 的沉积旋回代表了短偏心率周期和斜率周期, 1.9 m 和 1.5 m 的沉积旋回代表了岁差周期。

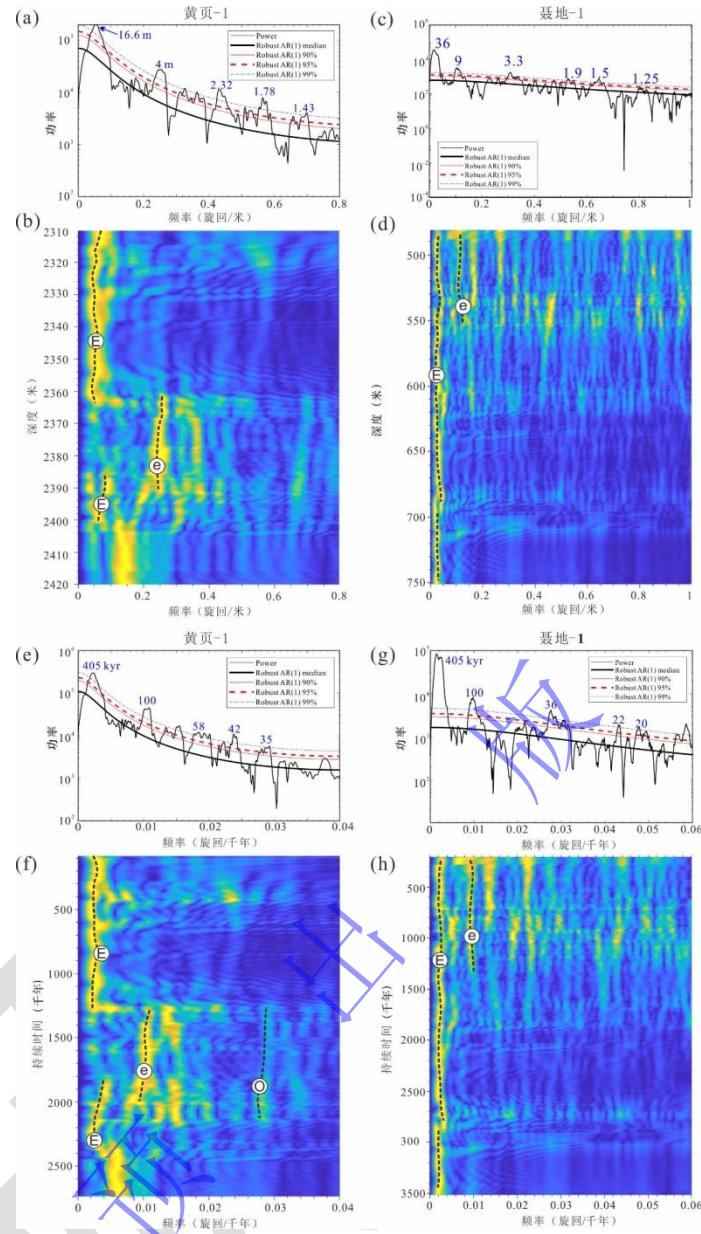


图3 HY1井和ND1井GR深度序列及时间序列的 2π MTM频谱分析及快速傅里叶变换

(a, b) HY1井GR深度序列MTM频谱图与快速傅里叶变换滑动频谱分析图,其中滑动窗口设定为30m,步长为0.16m;(c, d)ND1井GR深度序列MTM频谱图与快速傅里叶变换滑动频谱分析图,其中滑动窗口长度设定为25m,步长0.19m;(e, f)HY1井GR时间序列MTM频谱图与快速傅里叶变换滑动频谱分析图,识别出405kyr,100kyr,54kyr,42kyr和35kyr的天文周期;运行窗口为530kyr,步长为4kyr;(g, h)ND1井GR时间序列MTM频谱图与快速傅里叶变换滑动频谱分析图,识别出405kyr,100kyr,36kyr,22kyr和20kyr的天文周期;运行窗口设为660kyr,步长为5kyr

Fig.3 2π multitaper method (MTM) spectral analyses and evolutionary Fast Fourier Transform (e-FFT) of GR data series in the depth- and time- domain of the wells HY1 and ND1

(a, b) MTM spectral analysis and e-FFT of GR data series in depth-domain in well HY1; using a 30 m running window with a 0.16 m step; (c, d) MTM spectral analysis and e-FFT of GR data series in well ND1; using a 25 m running window with a 0.19 m step; (e, f) MTM spectral analysis and e-FFT of GR data series in the time-domain in well HY1, showing primary astronomical period of 405 kyr, 100 kyr, 58 kyr, 42 kyr, and 35 kyr; using a 530 kyr running window with a 4 kyr step; (g, h) MTM spectral analysis and e-FFT of GR data series in time-domain in well ND1, showing primary astronomical period of 405 kyr, 100 kyr, 36 kyr, 22 kyr, 20 kyr; using a 660 kyr running

window with a 5 kyr step

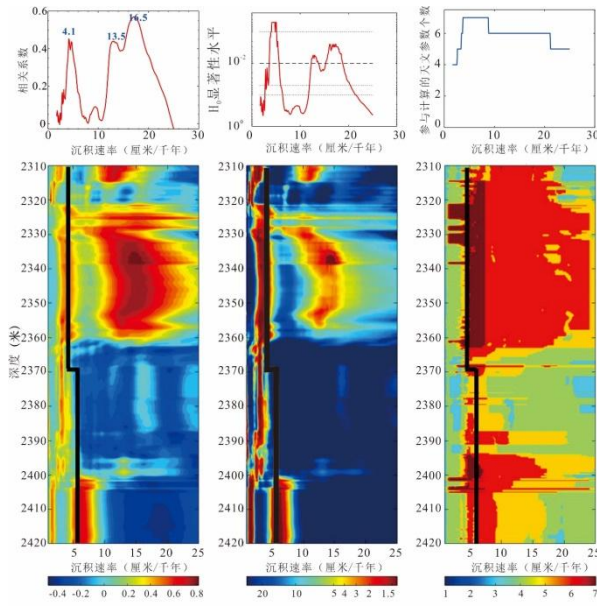


图4 贵州南部地区HY1井九门冲组GR数据相关系数(COCO)及演化相关系数分析(eCOCO) 沉积速率范围选择1~25 cm/kyr, 步长为0.1 cm/kyr; 据文献[36]天文周期方案, 天文周期设定为405.0, 125.0, 95.0, 32.1, 20.3, 19.4, 16.7; 蒙特卡罗模拟设定为2 000

Fig.4 “COCO” and “eCOCO” analyses of the Jiumenchong Formation GR data of the well HY1 in southern Guizhou Province

The sedimentation rates were set ranging from 1-25 cm/kyr with a 0.1 cm/kyr step; based on reference [36], astronomical periods were set to be 405.0, 125.0, 95.0, 32.1, 20.3, 19.4, and 16.7; the Monte Carlo analysis was set to 2 000 iterations

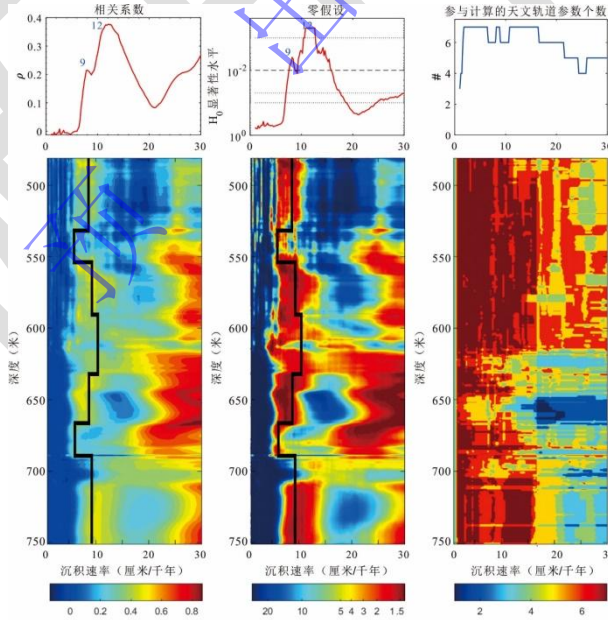


图5 湖北宜昌地区ND1井牛蹄塘组GR数据相关系数(COCO)及演化相关系数分析(eCOCO) 沉积速率范围选择0~30 cm/kyr, 步长为0.2 cm/kyr; 据文献[36]天文周期方案, 天文周期设定为405.0, 125.0, 95.0, 32.1, 20.3, 19.4, 16.7; 蒙特卡罗模拟设定为2 000

Fig.5 “COCO” and “eCOCO” analyses of the Niutitang Formation GR data of well ND1 in the Yichang region, Hubei Province

The sedimentation rates were set ranging from 0-30 cm/kyr with a 0.2 cm/kyr step; based on reference [36], astronomical periods were

set to be 405.0, 125.0, 95.0, 32.1, 20.3, 19.4, and 16.7; the Monte Carlo analysis was set to 2 000 iterations

3.2 时间域频谱分析

以 HY1 井 16.6 m 和 ND1 井 36 m 沉积旋回对应 405 kyr 偏心率周期建立年代模型, 基于该年代模型分别将两口井深度测井序列调谐至时间域。对调谐后的时间域数据进行插值和去趋势处理, 然后进行频谱分析和快速傅里叶变换分析。HY1 井时间域频谱分析显示了明显的 405 kyr, 100 kyr 及 35 kyr 的长偏心率、短偏心率及斜率周期, 快速傅里叶变换图谱显示了对应的米兰科维奇周期信号(图 3e, f)。ND1 井时间域频谱分析显示了明显的 405 kyr, 100 kyr 及 36 kyr 的长偏心率、短偏心率及斜率周期以及 22 kyr 和 20 kyr 的岁差(图 3g, h)。

4 讨论

4.1 鄂西—黔南地区下寒武统富有机质页岩天文年代标尺

肖滩剖面年代地层学研究表明, 朱家箐组顶界面年龄约为 526.5 ± 1.1 Ma~ 526.86 ± 0.16 Ma^[37-38]。根据层序地层对比, HY1 井九门冲组顶部灰岩及 ND1 井牛蹄塘组灰岩顶界面可能为 526.86 ± 0.16 Ma, 但灰岩底界面年龄尚不清楚。由于肖滩剖面朱家箐组上部第一套硅质白云岩年龄为 535.2 ± 1.7 Ma~ 538.2 Ma ± 1.5 Ma^[39-41], 因此推测出 HY1 井和 ND1 井灰岩底界面年龄(2 300 m 和 480 m 处)年龄可能为 535.2 ± 1.7 Ma~ 538.2 Ma ± 1.5 Ma 或更年轻。因此, 本次研究将 535.2 ± 1.7 Ma 作为天文年代标尺的锚点。

旋回地层学分析表明鄂西—黔南下寒武统沉积旋回受控于轨道周期。通过将 HY1 井和 ND1 井深度域序列调谐到时间域序列, 建立了两口井“浮动”天文年代标尺。研究结果表明, HY1 井九门冲组富有机质页岩持续时间为 2.6 Myr(图 3f、图 6), ND1 井下寒武统含碳页岩持续时间仅为 3.3 Myr(图 3h、图 6)。由于二者持续时间不一致, 因此本研究给出两种绝对天文年代标尺方案。方案一以 535.2 ± 1.7 Ma 作为 HY1 井九门冲组富有机质页岩顶部锚点, 方案二将 535.2 ± 1.7 Ma 作为 ND1 井牛蹄塘组顶部锚点。由于层序地层对比并不能建立等时地层, 但同一区域的海平面变化是同步的, 因此, 对比两口井下寒武统时期的相对海平面变化, 可以在时间上建立对应关系。

ND1 井位于台地相, HY1 井位于深水斜坡相, 二者所处位置反映的海平面变化应具有一致性。Li *et al.*^[35]开发了沉积噪音模型(DYNOT 和 $\rho 1$)重建大陆边缘海平面变化, 该方法已被证明是有效的海(或湖)平面重建方法, 被广泛用于全球大洋及陆地古湖平面变化的重建中。本研究对调谐后的自然伽马序列进行沉积噪音模拟, 分别获取了 HY1 井和 ND1 井的 DYNOT 和 $\rho 1$ 曲线(图 6)。HY1 井相对海平面变化反映了两次升降旋回, 这和刘忠宝等^[7]

划分的两个三级层序对应。此外，两次海平面升降旋回大致对应两个 1.2 Myr 长周期旋回，表明了该时期三级海平面层序可能与 1.2 Myr 斜率周期存在联系。相比之下，ND1 井总体上以牛蹄塘组下段高海平面和上段低海平面为特征，相对海平面变化反映了一个下降半旋回和两次上升—下降旋回。根据其变化的幅度，将两次上升—下降旋回和 HY1 井九门冲组海平面变化对应，结果表明 4 条海平面变化曲线吻合度较高，且 HY1 井和 ND1 井 405 kyr 长偏心率旋回及 1.2 Myr 长周期旋回均对应良好（图 6）。

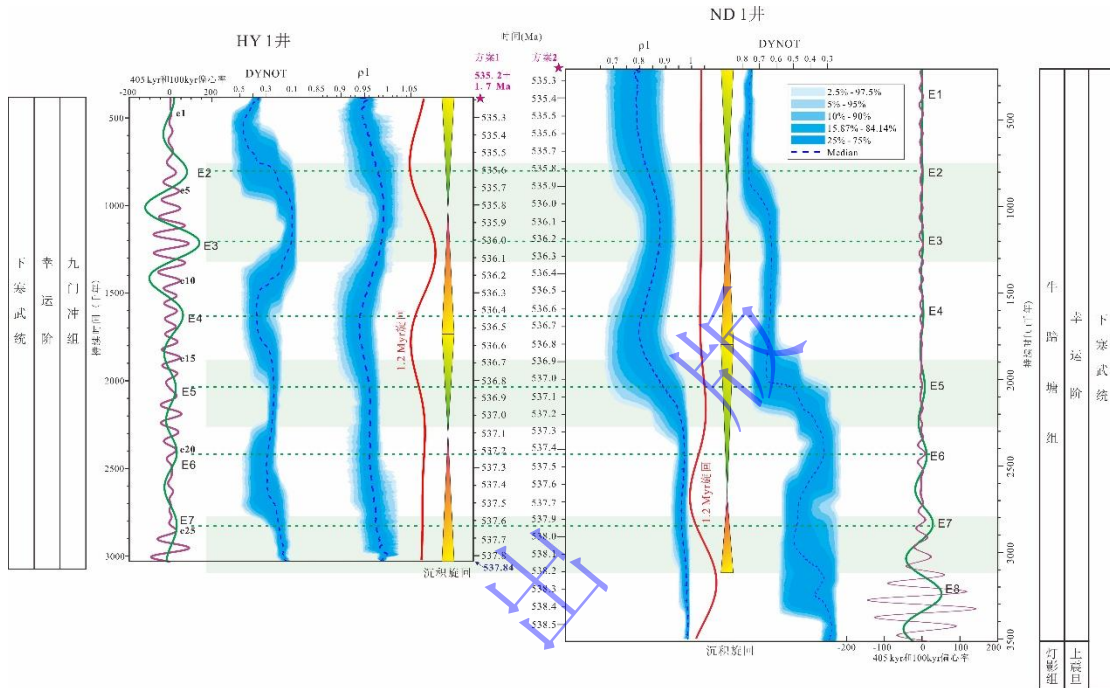


图 6 鄂西 ND1 井和黔南 HY1 井富有机质页岩层段海平面变化及建立的天文年代标尺

DYNOT 和 $p1$ 窗口设为 400 kyr，用 2000 次迭代的蒙特卡罗分析估计置信水平，浅绿色条带代表高海平面时期，绿色虚线将两口井偏心率最大值对应

Fig.6 Sea-level changes and astronomical time scale of organic-rich shales layer of well ND1 in western Hubei and well HY1 in southern Guizhou

the DYNOT and $p1$ calculations were performed using a running window of 400 kyr, and the confidence levels were estimated through Monte Carlo analysis with 2 000 iterations; the light green bar represent high sea level periods, and the green dashed line represent the eccentricity maximum of two wells

尽管本研究建立了两种方案的天文年代标尺，且根据相对海平面变化、偏心率及斜率调幅旋回及沉积层序对比大致建立了两口井的等时关系，将这两种方案的误差控制在 0.1 Ma，但由于控制锚点年龄本身具有误差和限制性，故本研究所建立的天文年代标尺需要进一步检验和验证。对比中国寒武纪最新年代地层和时间框架^[42]，本研究表明 ND1 井牛蹄塘组及 HY1 井九门冲组处于寒武纪幸运阶。

4.2 富有机质页岩的驱动因素

贵州黔南地区下寒武统九门冲组岩性主要为硅质、碳质页岩及泥岩，具有厚度大、有机

质丰度高的特征，TOC 含量分布范围为 2%~10%，自然伽马测井值高，其变化趋势和 TOC 含量具有相似性（图 7）。研究表明，下寒武统九门冲组为深水陆棚沉积环境^[43]。前期地球化学分析表明九门冲组黑色页岩沉积过程受到热液活动的影响^[44]，深部物质通过深大断裂上涌进入海水，提供了丰富的物质来源。

鄂西地区下寒武统牛蹄塘组岩性主要为含碳页岩，具有厚度大、有机质丰度高的特征。TOC 含量分布范围为 2%~20%，且牛蹄塘组下段 TOC 含量明显高于上段（图 8）。地球化学元素比 V/Cr 和 V/V+Ni 显示和 TOC 含量相似的变化，表明高 TOC 段水体处于缺氧的环境中^[26,45]。前期研究已经证实，ND1 井牛蹄塘组下段页岩处于缺氧—硫化环境，上段页岩下部处于缺氧环境，上部处于次氧化—缺氧环境^[26]。热液活动同样为黑色页岩的形成提供了物质条件，且早期热液活动明显强于晚期，这主要与寒武纪早期扬子板块的快速拉张裂解有关^[26]。上涌的热液与碎屑物质混合后，则形成了大陆边缘背景下具有洋盆特征的黑色岩系。

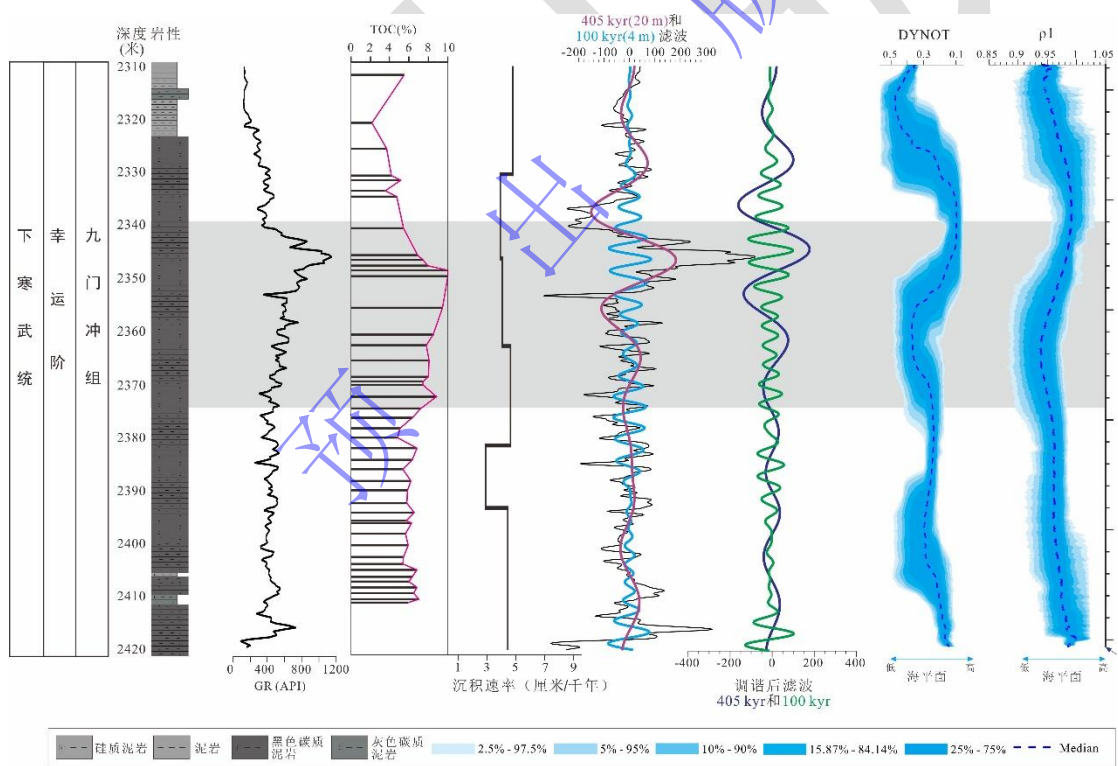


图 7 HY1 井九门冲组自然伽马曲线、有机碳含量变化、沉积速率、长短偏心率滤波及海平面变化
 Fig.7 GR data series, total organic carbon content (TOC), sedimentation rates, long- and short- eccentricity filters, and sea-level changes of the Jiumenchong Formation in well HY1

生产力升高，大洋内部氧气含量下降，适宜的沉积速率，有机碳埋藏增加及火山活动通常被认为是有机质富集的主要因素^[14,46-49]，而轨道驱动则被认为是这些因素的诱因^[50-51]。研究表明，地球轨道周期对黑色页岩的形成具有控制作用^[51]。偏心率调幅的岁差气候可以影

响大陆风化、区域径流、海洋富营养化以及生产力和氧化还原条件变化^[52-55]。其次，岁差可以影响到不同纬度的季风强度、降雨和温度的差异。很多研究提出了偏心率和岁差气候对富有机质页岩形成的解释模型。如 Wei *et al.*^[44]和 Zhang *et al.*^[56]提出在新生代陆相湖盆中，岁差处于夏季的极小值时期更有利于有机质的富集和保存，湖泊生产力水平也在此时处于高值。当夏季岁差处于极大值时期，湖平面下降导致有机质被动处于氧化的环境中，因此不利于有机质的保存。

鄂西—黔南地区处于被动大陆边缘背景下的浅水—深水陆棚环境，轨道的 405 kyr 偏心率旋回对页岩层系沉积具有明显的控制作用（图 3，7，8）。研究结果显示，页岩沉积层段有机质含量和 405 kyr 旋回在相位上具有同步幅度的变化，这在 ND1 井牛蹄塘组下段尤为明显。ND1 井牛蹄塘组下段两个 TOC 高值段对应于 405 kyr 旋回最大值，其持续时间大约为 405 kyr（图 8 灰色区域），而两个 TOC 含量高值之间的低值段正好对应了两个 405 kyr 旋回之间的低值（图 8，约 720 m）。此外，高 TOC 值段明显对应的 405 kyr 旋回幅度变化大，而相对低的 TOC 值段对应的 405 kyr 旋回幅度变化小（图 7 和图 8 灰色区域）。由于岁差旋回受到偏心率的调制作用，因此，在此推测 405 kyr 幅度大的时期其对应的岁差周期幅度波动也较大。然而，由于太阳系混沌行为，不可能得到精确的偏心率结论^[18]。在早寒武世，轨道对有机质富集的影响只能通过假设，不可能确定偏心率最大值对应有机碳含量最大值或最小值，从而能够解释偏心率驱动的生产力或偏心率控制的保存条件对有机质富集的影响^[57]。Wichern *et al.*^[58]提出了海相沉积的偏心率假设模型，当偏心率最小值处于 2.4 Myr 长周期节点，季节性反差是可以避免的，这将导致大陆地区风化层建造的形成。在第一次剧烈的岁差最大值期间，这些累计的风化层及其所含的养分将被侵蚀，导致水体富营养化。随后的岁差最小值期间，水文循环减弱，但营养元素的再循环也能够导致缺氧条件下黑色页岩的形成。本次研究援引这一假设模型对本文结果进行解释（图 9）。由于岁差引起的太阳辐射变化在南、北两个半球是相反的，因此，两个半球低纬季风气候的岁差尺度响应也具有相反的变化趋势^[59]。早寒武世上扬子地区处于北半球低纬度地区，因此在岁差最小值期间，水文循环和亚洲夏季风降雨增强，这将导致风化层的养分被侵蚀，导致水体富营养化。假如有机碳含量最大值和理论轨道偏心率最大值同步，本研究推测在更长的时间里强季节性变化在某种程度上触发了黑色页岩的富集^[14]，而偏心率最大值也可以导致气候变暖，更有利于碳的吸收^[60]。

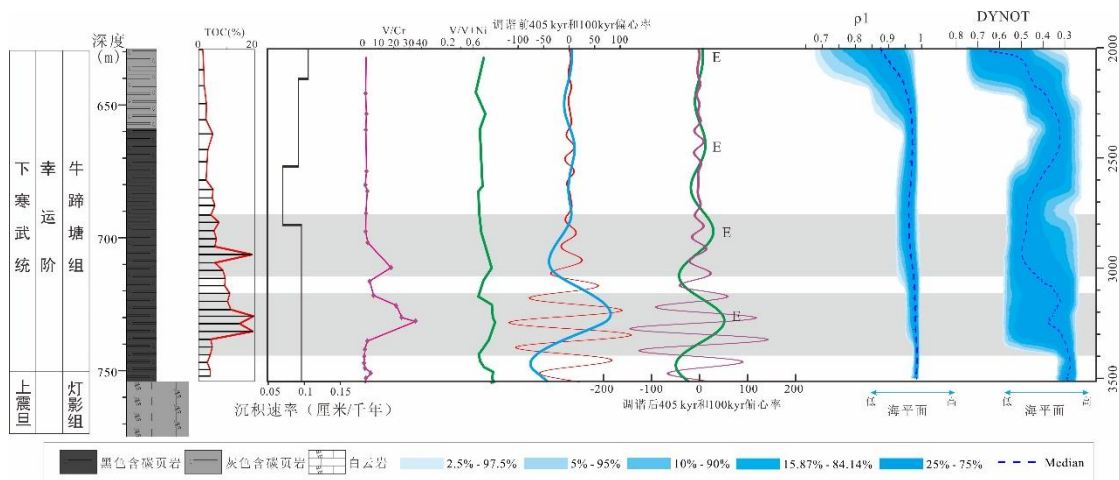


图8 ND1井牛蹄塘组有机碳含量变化、沉积速率、地球化学变化、长短偏心率滤波及海平面变化
 Fig.8 TOC, sedimentation rates, geochemical variations, long- and short-eccentricity filters, and sea-level changes of the Niutitang Formation in well ND1

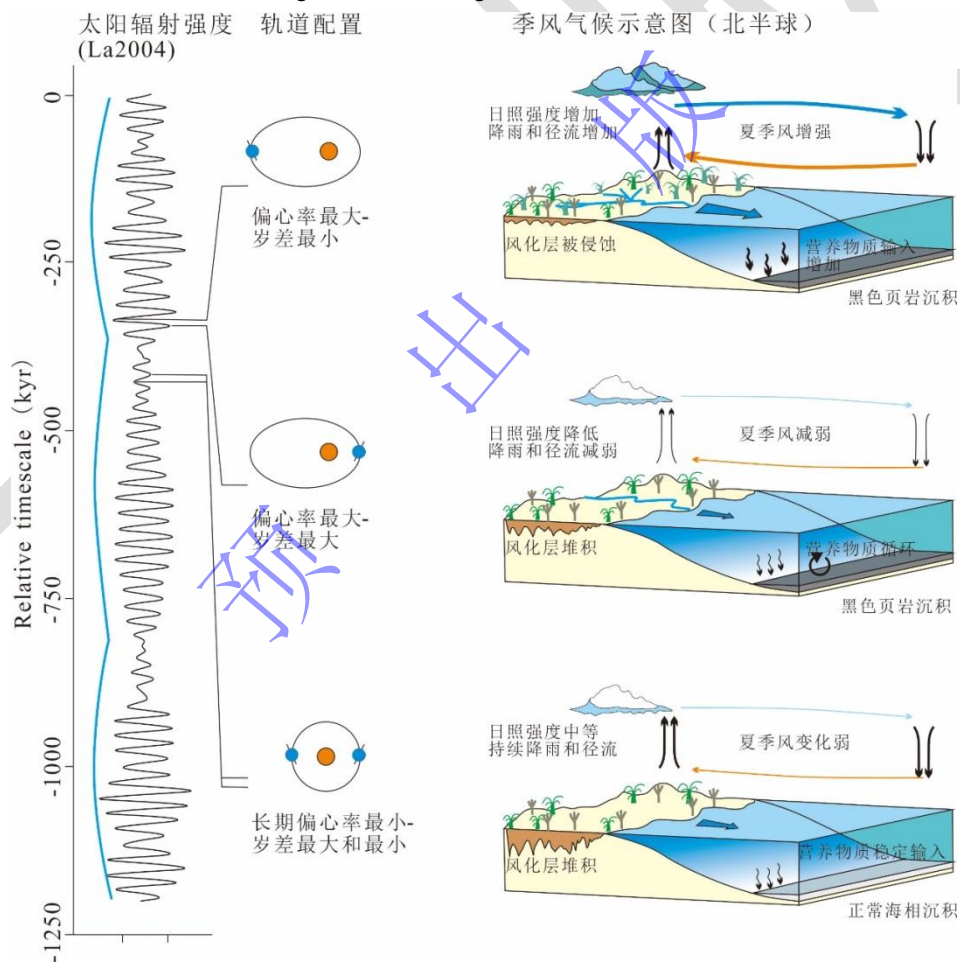


图9 轨道尺度富有机质页岩形成的偏心率最小值假设示意图 (据文献[58]修改)

图中蓝线代表 405 kyr 偏心率旋回

Fig.9 Schematic illustration of the eccentricity minimum hypothesis of organic-rich shales formation under the orbital-scale (modified from reference [58])

the blue line represent 405 kyr eccentricity cycles

从有机碳含量和相对海平面变化的对比可以看出海平面下降时期 (2 320~2 330 m 和

630~660 m) 对应于较低 TOC 值段 (图 7, 8), 而在高 TOC 值段, 海平面总体较高, 这表明富有机质页岩的形成和海平面高低具有较大的联系。然而, HY1 井 2 350~2 370 m 沉积间隔, 相对下降的海平面对应于相对高的有机碳含量; ND1 井 660~690 m 间隔, 高海平面段对应于低有机碳含量, 以上结果表明, 海平面变化和有机质富集并不是因果关系, 可能存在其他的驱动因素。由于海平面变化受到 1.2 Myr 旋回的调制, 而高有机碳含量可能受到偏心率最大值的调制, 因此, 本研究推测地球轨道参数变化是驱动海平面变化和富有机质黑色页岩富集的主要因素。ND1 井高 TOC 段持续了约 810 kyr, TOC 突然升高表明这一时期可能穿过了某个阈值, 使得大洋缺氧^[14]。前期研究表明深部热液为有机质富集提供了丰富的营养物质来源, 根据以上结果推测热液活动可能形成于有机质富集之前, 而在高有机碳含量期间死亡的生物得以快速沉降富集。

5 结论

(1) 基于 GR 曲线的旋回地层学分析表明, ND1 井目标层段 36 m 和 9 m 沉积旋回为轨道周期 405 kyr 和 100 kyr, HY1 井 16.6 m 和 4 m 沉积旋回为轨道周期 405 kyr 和 100 kyr。将两口井 36 m 和 16.6 m 的波长调谐到长偏心率周期, 建立 ND1 井 3.3 Myr 和 HY1 井 2.6 Myr 的“浮动”天文时间标尺。以文献报道的绝对年龄 535.2 ± 1.7 Ma 分别作为 HY1 井九门冲组和 ND1 井牛蹄塘组顶界锚点, 建立了两种方案的天文年代标尺。其中, HY1 井年龄区间为 535.2 ± 1.7 Ma~ 537.84 ± 1.7 Ma, ND1 井年龄区间为 535.3 ± 1.7 Ma~ 538.6 ± 1.7 Ma。

(2) 基于沉积噪音模型建立了两口井下寒武统沉积时期的相对海平面变化。研究结果表明, 两口井的相对海平面变化具有同步性, 对应于两个沉积层序和 1.2 Myr 的长周期斜率波动旋回。

(3) 鄂西—黔南下寒武统富有机质页岩高有机碳含量 (TOC) 段对应于 405 kyr 旋回最大值, 而 TOC 低值段正好对应了 ND1 井两个 405 kyr 旋回之间的低值。由于太阳系混沌行为, 无法准确预测寒武纪早期理论轨道偏心率对富有机质页岩的驱动机制。本研究假设偏心率最大值和有机碳含量最大值对应, 则在更长的时间里强季节性变化在某种程度上触发了黑色页岩的富集。TOC 高值段既对应海平面较高时期, 也对应海平面较低时期, 表明海平面变化和有机质富集并不具有因果关系。

致谢 审稿专家、编辑部老师提供了建设性意见, 为提高本文质量提供了极大的帮助, 在此一并感谢。同时感谢中国石油化工股份有限公司提供的测井数据。

参考文献 (References)

- [1] 祝庆敏, 卢龙飞, 潘安阳, 等. 湘西地区下寒武统牛蹄塘组页岩沉积环境与有机质富集[J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 797-809, 854. [Zhu Qingmin, Lu Longfei, Pan Anyang, et al. Sedimentary environment and organic matter enrichment of the Lower Cambrian Niutitang Formation shale, western Hunan province, China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(5): 797-809, 854.]
- [2] Ernst R E, Wingate M T D, Buchan K L, et al. Global record of 1600-700 Ma Large Igneous Provinces (LIPs): Implications for the reconstruction of the proposed Nuna (Columbia) and Rodinia supercontinents[J]. Precambrian Research, 2008, 160(1/2): 159-178.
- [3] Ernst R E, Hamilton M A, Söderlund U, et al. Long-lived connection between southern Siberia and northern Laurentia in the Proterozoic[J]. Nature Geoscience, 2016, 9(6): 464-469.
- [4] Zhao G C, Wang Y J, Huang B C, et al. Geological reconstructions of the East Asian blocks: From the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 186: 262-286.
- [5] 赵彦彦, 郑永飞. 全球新元古代冰期的记录和时限[J]. 岩石学报, 2011, 27(2): 545-565. [Zhao Yanyan, Zheng Yongfei. Record and time of Neoproterozoic glaciations on earth[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(2): 545-565.]
- [6] 周航兵. 湘西北下寒武统底部黑色岩系地球化学特征及地质意义[D]. 南昌: 东华理工大学, 2019. [Zhou Hangbing. Geochemical characteristics and geological significance of the Lower Cambrian black rock series in northwestern Hunan[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2019.]
- [7] 刘忠宝, 杜伟, 高波, 等. 层序格架中富有机质页岩发育模式及差异分布: 以上扬子下寒武统为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(1): 1-14. [Liu Zhongbao, Du Wei, Gao Bo, et al. Sedimentary model and distribution of organic-rich shale in the sequence stratigraphic framework: A case study of Lower Cambrian in Upper Yangtze region[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, 48(1): 1-14.]
- [8] Hemmesch N T, Harris N B, Mnich C A, et al. A sequence-stratigraphic framework for the Upper Devonian Woodford shale, Permian Basin, West Texas[J]. AAPG Bulletin, 2014, 98(1): 23-47.
- [9] Brett C E, Baird G C, Bartholomew A J, et al. Sequence stratigraphy and a revised sea-level curve for the Middle Devonian of eastern North America[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2011, 304(1/2): 21-53.
- [10] Abouelresh M O, Slatt R M. Lithofacies and sequence stratigraphy of the Barnett shale in East-Central Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(1): 1-22.
- [11] Halgedahl S L, Jarrard R D, Brett C E, et al. Geophysical and geological signatures of relative sea level change in the Upper Wheeler Formation, Drum Mountains, West-Central Utah: A perspective into exceptional preservation of fossils[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2009, 277(1/2): 34-56.
- [12] 吴靖, 姜在兴, 吴明昊. 细粒岩层序地层学研究方法综述[J]. 地质科技情报, 2015, 34(5): 16-20. [Wu Jing, Jiang Zaixing, Wu Minghao. Summary of research methods about the sequence stratigraphy of the fine-grained rocks[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(5): 16-20.]
- [13] 梅冥相, 张海, 孟晓庆, 等. 上扬子区下寒武统的层序地层划分和层序地层格架的建立[J]. 中国地质, 2006, 33(6): 1292-1304. [Mei Mingxiang, Zhang Hai, Meng Xiaoqing, et al. Sequence stratigraphic division and framework of the Lower Cambrian in the Upper Yangtze Region[J]. Geology in China, 2006, 33(6): 1292-1304.]
- [14] Silva A F, Santos T P, Xavier P L A, et al. Constraining the duration of the southern Gondwana Irati-Whitehill Sea through cyclostratigraphy and its relation with deep-time astronomical solutions[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2023, 629: 111791.
- [15] Zeebe R E, Lourens L J. Solar System chaos and the Paleocene-Eocene boundary age constrained by geology and astronomy[J]. Science, 2019, 365(6456): 926-929.
- [16] Hinnov L A. Cyclostratigraphy and its revolutionizing applications in the earth and planetary sciences[J]. GSA Bulletin, 2013, 125(11/12): 1703-1734.
- [17] Milankovitch M. Kanon der erdbestrahlungen und seine anwendung auf das eiszeitenproblem[M]. Belgrade: Royal Serbian Academy, 1941.
- [18] Laskar J, Robutel P, Joutel F, et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth[J]. Astronomy &

- Astrophysics, 2004, 428(1): 261-285.
- [19] Zhao Z F, Thibault N R, Dahl T W, et al. Synchronizing rock clocks in the Late Cambrian[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1990.
- [20] 周杨, 金思丁, 刘岩, 等. 川西南下寒武统筇竹寺组页岩旋回地层学研究[J/OL]. 沉积学报, doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.013. [Zhou Yang, Jin Siding, Liu Yan, et al. Cyclostratigraphy research on well-logging of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in southwestern Sichuan Basin[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.013.]
- [21] Zhang T, Li Y F, Fan T L, et al. Orbitally-paced climate change in the early Cambrian and its implications for the history of the Solar System[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2022, 583: 117420.
- [22] Scotese C R. Atlas of Cambrian and Early Ordovician Paleogeographic Maps (Mollweide Projection), maps 81-88, volumes 5. The Early Paleozoic, PALEOMAP Atlas for ArcGIS[M]. PALEOMAP Project, Evanston, IL, 2014, doi:10.13140/2.1.4756.7369
- [23] Ye Y T, Wang H J, Wang X M, et al. Tracking the evolution of seawater Mo isotopes through the Ediacaran–Cambrian transition[J]. Precambrian Research, 2020, 350: 105929.
- [24] Shu L S, Faure M, Yu J H, et al. Geochronological and geochemical features of the Cathaysia block (South China): New evidence for the Neoproterozoic breakup of Rodinia[J]. Precambrian Research, 2011, 187(3/4): 263-276.
- [25] 付勇, 周文喜, 王华建, 等. 黔北下寒武统黑色岩系的沉积环境与地球化学响应[J]. 地质学报, 2021, 95(2): 536-548. [Fu Yong, Zhou Wenxi, Wang Huajian, et al. The relationship between environment and geochemical characteristics of black rock series of Lower Cambrian in northern Guizhou[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(2): 536-548.]
- [26] 梁小聪, 牛杏, 胡明毅, 等. 湘鄂西下寒武统牛蹄塘组黑色页岩发育特征及沉积环境[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(4): 102-114. [Liang Xiaocong, Niu Xing, Hu Mingyi, et al. Development characteristics and sedimentary environment of black shale of Lower Cambrian Niutitang Formation in western Hunan and Hubei[J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(4): 102-114.]
- [27] 李海, 陈孝红, 彭中勤, 等. 湘鄂西地区下寒武统牛蹄塘组页岩气储层特征[J]. 地质学报, 2022, 96(4): 1421-1433. [Li Hai, Chen Xiaohong, Peng Zhongqin, et al. Shale gas reservoir characteristics of the Lower Cambrian Niutitang Formation in the western Hunan and Hubei areas[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(4): 1421-1433.]
- [28] 牛杏. 湘鄂西下寒武统牛蹄塘组石英成因类型及其对页岩储层物性的影响[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2019. [Niu Xing. Genetic types of quartz and its influence on shale reservoir physical properties of the Lower Cambrian Niutitang Formation in western Hunan and Hubei[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2019.]
- [29] Liu Z B, Gao B, Hu Z Q, et al. Pore characteristics and Formation mechanism of high-maturity organic-rich shale in Lower Cambrian Jiemenchong Formation, southern Guizhou[J]. Petroleum Research, 2018, 3(1): 57-65.
- [30] 吴怀春, 张世红, 黄清华. 中国东北松辽盆地晚白垩世青山口组浮动天文年代标尺的建立[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 159-169. [Wu Huaichun, Zhang Shihong, Huang Qinghua. Establishment of floating astronomical time scale for the terrestrial Late Cretaceous Qingshankou Formation in the Songliao Basin of Northeast China[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4): 159-169.]
- [31] Huang C J, Hinnov L. Astronomically forced climate evolution in a saline lake record of the Middle Eocene to Oligocene, Jiangnan Basin, China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2019, 528: 115846.
- [32] Schnyder J, Ruffell A, Deconinck J F, et al. Conjunctive use of spectral gamma-ray logs and clay mineralogy in defining Late Jurassic-Early Cretaceous palaeoclimate change (Dorset, U.K.)[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 229(4): 303-320.
- [33] Li M S, Huang C J, Hinnov L, et al. Obliquity-forced climate during the Early Triassic hothouse in China[J]. Geology, 2016, 44(8): 623-626.
- [34] Li M S, Hinnov L, Kump L. *Acycle*: Time-series analysis software for paleoclimate research and education[J]. Computers & Geosciences, 2019, 127: 12-22.
- [35] Li M S, Hinnov L A, Huang C J, et al. Sedimentary noise and sea levels linked to land-ocean water exchange and obliquity forcing[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 1004.

- [36] Waltham D. Milankovitch Period uncertainties and their impact on cyclostratigraphy[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2015, 85(8): 990-998.
- [37] Compston W, Zhang Z C, Cooper J A, et al. Further SHRIMP geochronology on the Early Cambrian of South China[J]. *American Journal of Science*, 2008, 308(4): 399-420.
- [38] 杨传. 华南埃迪卡拉系上部: 寒武系下部高精度地质年代学[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2017. [Yang Chuan. High precision geochronology of the Upper Ediacaran-Lower Cambrian in South China[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, 2017.]
- [39] Zhu R X, Li X H, Hou X G, et al. SIMS U-Pb zircon age of a tuff layer in the Meishucun section, Yunnan, Southwest China: Constraint on the age of the Precambrian-Cambrian boundary[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(9): 1385-1392.
- [40] Sawaki Y, Nishizawa M, Suo T, et al. Internal structures and U-Pb ages of zircons from a tuff layer in the Meishucunian Formation, Yunnan province, South China[J]. *Gondwana Research*, 2008, 14(1/2): 148-158.
- [41] Jenkins R J F, Cooper J A, Compston W. Age and biostratigraphy of Early Cambrian tuffs from SE Australia and southern China[J]. *Journal of the Geological Society*, 2002, 159(6): 645-658.
- [42] 朱茂炎, 杨爱华, 袁金良, 等. 中国寒武纪综合地层和时间框架[J]. *中国科学 (D辑): 地球科学*, 2019, 49(1): 26-65. [Zhu Maoyan, Yang Aihua, Yuan Jinliang, et al. Cambrian integrative stratigraphy and timescale of China[J]. *Science China (Series D): Earth Sciences*, 2019, 62(1): 26-65.]
- [43] 刘忠宝, 高波, 胡宗全, 等. 高演化富有机质页岩储层特征及孔隙形成演化: 以黔南地区下寒武统九门冲组为例[J]. *石油学报*, 2017, 38(12): 1381-1389. [Liu Zhongbao, Gao Bo, Hu Zongquan, et al. Reservoir characteristics and pores formation and evolution of high matured organic rich shale: A case study of Lower Cambrian Jiumenchong Formation, southern Guizhou area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(12): 1381-1389.]
- [44] 侯东壮, 吴湘滨, 邓鑫楠. 贵州铜仁地区九门冲组黑色页岩地球化学特征及成岩环境研究[J]. *地质与勘探*, 2019, 55(3): 779-788. [Hou Dongzhuang, Wu Xiangbin, Deng Xinan. Geochemical characteristics and diagenetic setting of the Jiumenchong Formation black shale in the Tongren area of Guizhou province[J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(3): 779-788.]
- [45] Wei X S, Deng Y, Yan D T, et al. Organic matter enrichment in Asia's palaeolake controlled by the early and Middle Eocene global warming and astronomically driven precessional climate[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 154: 106342.
- [46] Barclay R S, McElwain J C, Sageman B B. Carbon sequestration activated by a volcanic CO₂ pulse during Ocean Anoxic Event 2[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(3): 205-208.
- [47] Kuypers M M M, Pancost R D, Nijenhuis I A, et al. Enhanced productivity led to increased organic carbon burial in the euxinic North Atlantic Basin during the Late Cenomanian oceanic anoxic event[J]. *Paleoceanography*, 2002, 17(4): 1051.
- [48] Schoepfer S D, Shen J, Wei H Y, et al. Total organic carbon, organic phosphorus, and biogenic barium fluxes as proxies for paleomarine productivity[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 149: 23-52.
- [49] Tyson R V. The genesis and palynofacies characteristics of marine petroleum source rocks[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1987, 26(1): 47-67.
- [50] Batenburg S J, De Vleeschouwer D, Sprovieri M, et al. Orbital control on the timing of oceanic anoxia in the Late Cretaceous[J]. *Climate of the Past*, 2016, 12(10): 1995-2009.
- [51] Meyers S R, Sageman B B, Arthur M A. Obliquity forcing of organic matter accumulation during Oceanic Anoxic Event 2[J]. *Paleoceanography*, 2012, 27(3): PA3212.
- [52] Rachold V, Brumsack H J. Inorganic geochemistry of Albian sediments from the Lower Saxony Basin NW Germany: Palaeoenvironmental constraints and orbital cycles[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 174(1/2/3): 121-143.
- [53] Gambacorta G, Menichetti E, Trincianti E, et al. Orbital control on cyclical primary productivity and benthic anoxia: Astronomical tuning of the Telychian Stage (Early Silurian)[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 495: 152-162.
- [54] Lu M, Lu Y H, Ikejiri T, et al. Periodic oceanic euxinia and terrestrial fluxes linked to astronomical forcing during the Late

- Devonian Frasnian–Famennian mass extinction[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021, 562: 116839.
- [55] Ma W T, Tian J, Li Q Y, et al. Simulation of long eccentricity (400-kyr) cycle in ocean carbon reservoir during Miocene Climate Optimum: Weathering and nutrient response to orbital change[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(10): L10701.
- [56] Zhang J G, Jiang Z X, Liang C, et al. Astronomical forcing of meter-scale organic-rich mudstone–limestone cyclicity in the Eocene Dongying Sag, China: Implications for shale reservoir exploration[J]. *AAPG Bulletin*, 2022, 106(8): 1557-1579.
- [57] Jin S D, Deng H C, Zhu X, et al. Orbital control on cyclical organic matter accumulation in Early Silurian Longmaxi Formation shales[J]. *Geoscience Frontiers*, 2020, 11(2): 533-545.
- [58] Wichern N M A, Bialik O M, Nohl T, et al. Astronomically-paced climate and carbon-cycle feedbacks in the lead-up to the Late Devonian Kellwasser Crisis[J]. *Climate of the Past*, 2023, doi: 10.5194/cp-2023-58.
- [59] 刘晓东, 石正国. 岁差对亚洲夏季风气候变化影响研究进展[J]. *科学通报*, 2009, 54 (20) : 3097-3107. [Liu Xiaodong, Shi Zhengguo. Effect of precession on the Asian summer monsoon evolution: A systematic review[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(20): 3097-3107.]
- [60] Feulner G. Formation of most of our coal brought Earth close to global glaciation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(43): 11333-11337.

Cyclostratigraphic Analysis of the Lower Cambrian Shales in Western Hubei and Southern Guizhou

WEI XiaoSong¹, YAN DeTian¹, GONG Yin², NIU Xing³, LIANG WanLe¹, FU HaiJiao¹, LIU ZiXuan¹, YANG XiangRong³, ZHANG Bao¹

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources Ministry of Education, China, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

2. The Seventh Geological Brigade of Hubei Geological Bureau, Yichang, Hubei 443000, China

3. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

Abstract: [Objective] The Lower Cambrian organic-rich shale is an important marine shale exploration target in western Hubei and southern Guizhou. Understanding the chronostratigraphic relationships and their underlying causes of organic-rich shale intervals in different areas is crucial for shale gas exploration. [Methods] In this study, we conducted cyclostratigraphic analyses using natural gamma-ray logging data from the Lower Cambrian Niedi-1 well in western Hubei and the Huangye-1 well in southern Guizhou and determined the primary astronomical periods. Using previously reported zircon ages as anchoring points, we constructed an astronomical time scale for the Lower Cambrian. Using a sedimentary noise model, relative sea-level changes in the Lower Cambrian were reconstructed. [Results and Discussions] Our results reveal that wavelengths of 36 m and 9 m in well Niedi-1 and 16.6 m and 4 m in well HY1 correspond to orbital 405 kyr and 100 kyr cycles, respectively. Furthermore, we calculated the durations of the Niutitang Formation in well Niedi-1 and the Jiumengchong Formation in well Huangye-1 to be 3.3 and 2.6 Myr, respectively, with age intervals of 535.4±1.7 to 536.82±1.7 Ma and 535.2±1.7 to 537.84±1.7 Ma. Through correlation between sea-level change curves (DYNOT and ρ_1), eccentricity cycles, and sedimentary cycles, our results indicate that sea-level changes correspond to 1.2 Myr obliquity modulation cycles and two sedimentary sequences (SQ1 and SQ2). Comparing the total organic carbon content (TOC) of the Lower Cambrian organic-rich shale with orbital eccentricity, sedimentation rates, and sea-level changes, our findings

reveal that the intervals with high TOC value correlate with the maximum eccentricity of 405 kyr, whereas those with low TOC value correspond to the minimum value in well ND1. In addition, the high TOC value corresponds to both the high sea level period and the low sea level period. **[Conclusions]** Because of the chaotic behavior of the solar system, accurately predicting the mechanism that drives organic-rich shale during the early Cambrian is impossible. Assuming that the maximum eccentricity corresponds to the maximum organic carbon content at that time, strong seasonal variations have triggered the enrichment of black shale over a more extended period. Furthermore, the comparison between relative sea-level changes and organic carbon content reveals no causal relationship between sea-level fluctuations and the enrichment of organic matter.

Key words: Niutitang Formation; Jiumenchong Formation; orbital forcing; eccentricity; sedimentary noise model