

# 川南五峰组—龙马溪组有机质富集规律 ——基于旋回地层学的研究

肖强, 张廷山, 张喜, 李红俊, 雍锦杰, 刘宇龙, 李潇雨

西南石油大学地球科学与技术学院

**摘要** 基于钻井、测井资料,应用旋回地层学、地球化学等方法,探讨天文轨道周期驱动下的海平面变化对川南地区上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩有机质聚集的影响。应用川南地区Y8井GR数据序列,对五峰组—龙马溪组开展旋回地层学研究,识别了记录在沉积物中的斜率长周期(1.2 Ma)、长偏心率周期(405 ka)及短偏心率周期(100 ka)信号,并建立了该地质历史时期浮动的天文时间标尺。地球化学分析表明,川南地区五峰组—龙马溪组底部TOC较高,平均达3.16%,向上含量变低并趋于稳定。根据有机质碳同位素及微量元素指标(U/Th、V/Cr、Ni/Co、V/(V+Ni)),恢复了晚奥陶世—早志留世海平面变化及古海洋沉积环境。全球海平面升降变化趋势与斜率长周期(1.2 Ma)具有较好的相关性。川南地区五峰组—龙马溪组有机质聚集与斜率长周期驱动下的海平面升降变化及水体的氧化—还原条件密切相关:川南地区凯迪早期、赫南特晚期、鲁丹早期海平面上升,半深海—深海环境有利于有机质的形成和保存;观音桥层沉积期海平面下降,浅海环境不利于有机质的形成和保存。

**关键词** 天文轨道周期;海平面变化;古环境;有机质聚集;五峰组;龙马溪组;川南

**中图分类号**:TE122.1 **文献标识码**:A

## 0 前言

中国南方扬子区广泛发育上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组富有机质海相黑色页岩,有机质具有成熟度高、生烃能力强的特点,是页岩气勘探的重点地区<sup>[1]</sup>。目前关于有机质富集的控制因素,可以归纳为海洋表层初级生产力和有利的保存条件。以学者Sageman等<sup>[2]</sup>、Pedersen等<sup>[3]</sup>、腾格尔等<sup>[4]</sup>为代表的生产力学派认为,有机质富集主要受控于初级生产力,受水体氧化—还原条件影响较小,典型案例为大陆边缘上升洋流地区。以Mort等<sup>[5]</sup>、Arthur等<sup>[6]</sup>、王清晨等<sup>[7]</sup>、王淑芳等<sup>[8]</sup>为代表的氧化—还原学派认为,在缺氧的水体环境下,低的海洋表层初级生产力也能形成富有机质沉积物,典型案例为现代缺氧盆地黑海。上述相关研究多应用地球化学方法来恢复古海洋沉积环境和海平面升降变化

(海平面升降影响沉积环境),而对海平面升降变化的机制未作过多解释。

地球轨道参数的周期性变化引起了地球表面日照量的周期性变化,从而导致全球气候的周期性波动,并记录在对气候变化响应敏感的沉积系统中。这种由地球轨道驱动力引起的旋回性记录称为米兰科维奇旋回<sup>[9]</sup>。Vail等<sup>[10]</sup>、Laskar<sup>[11]</sup>认为长轨道周期(1.2 Ma, 2.4 Ma)与三级层序紧密相关。Boulila等<sup>[12]</sup>发现相同的 $\delta^{18}\text{O}$ 事件数目正好是斜率长周期(1.2 Ma)调节作用旋回的节点,其与三级层序的平均周期(1.14 Ma)具有良好对应。

轨道周期信号广泛记录在晚奥陶世—早志留世海相地层中,基于古气候替代性指标(GR、Fe/Ca、Ti/Ca等)可从地层中识别出天文轨道周期信号(如偏心率、斜率、岁差),其与地质历史事件有良好的对应关系。本文以川南五峰组—龙马溪组页岩为

收稿日期:2020-08-26;改回日期:2020-11-15;网络出版日期:2021-06-04

本文受国家科技重大专项课题“多场耦合筇竹寺组页岩气资源富集区优选”(编号:2017ZX05063-002-009),国家自然科学基金项目“多场耦合条件下甲烷/二氧化碳在页岩非均质储层中的动力学特征研究”(编号:4177021173)联合资助

**第一作者**:肖强,硕士研究生在读,从事旋回地层学和油气地质研究。通信地址:610500 四川省成都市新都区新都大道8号;E-mail:1690020356@qq.com

**通信作者**:张廷山,教授,主要从事沉积学研究。通信地址:610500 四川省成都市新都区新都大道8号;E-mail:zts\_3@126.com

例,从更为宏观的角度(轨道周期驱动力)来研究有机质聚集的影响因素。首先应用旋回地层学分析方法,基于GR数据序列进行时间序列分析,识别凯迪期—特列奇期天文轨道参数;然后通过对五峰组和龙马溪组总有机碳(TOC)、有机碳同位素( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ )及微量元素的分析,恢复古海洋沉积环境及海平面变化;进而探讨天文轨道周期驱动下的海平面变化对有机质聚集的影响。这可为相关研究提供一种切实可行的思路。

## 1 地质背景

四川盆地位于上扬子地台,是特提斯构造域内发育形成的海陆相复杂叠合盆地<sup>[13]</sup>。晚奥陶世—早志留世,受构造运动及海侵影响坳陷区沉降幅度增大,形成了多个富有机质页岩沉积中心,如川东北、川东—鄂西、川南等深水陆棚区(图1),发育大面积低能欠补偿的贫氧—缺氧沉积环境<sup>[14-15]</sup>。川南地区Y8井(位置见图1)各类地质、地球化学资料齐全,是本次重点研究的对象。

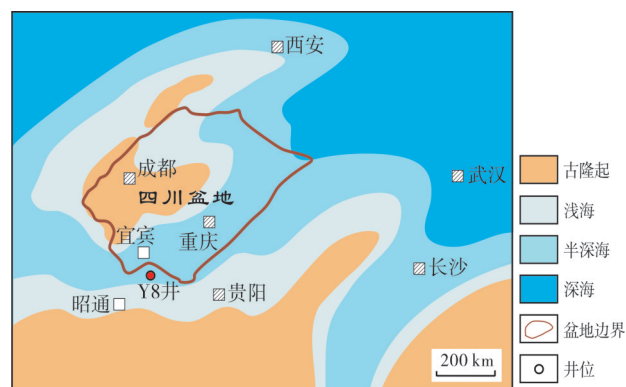


图1 中上扬子晚奥陶世—早志留世岩相古地理图  
(据文献[13-15]编制)

Fig. 1 Lithofacies paleogeography of the Middle-Upper Yangtze from Late Ordovician to Early Silurian (compiled according to reference [13-15])

利用Y8井岩相、地球化学及测井资料,参照陈旭等划分出的13个笔石带<sup>[16]</sup>,建立了五峰组—龙马溪组地层格架。本次研究涉及的地层自上而下为志留系韩家店组、龙马溪组,奥陶系五峰组、临湘组(图2),总厚度为416 m。如图2所示:Y8井底部临湘组GR值较低,与瘤状灰岩有关;上覆地层GR值(测量间距为0.125 m)在20~310 API之间,其中低值与粉—细砂岩和泥灰岩对应,高值与黑色页岩和泥岩对应。

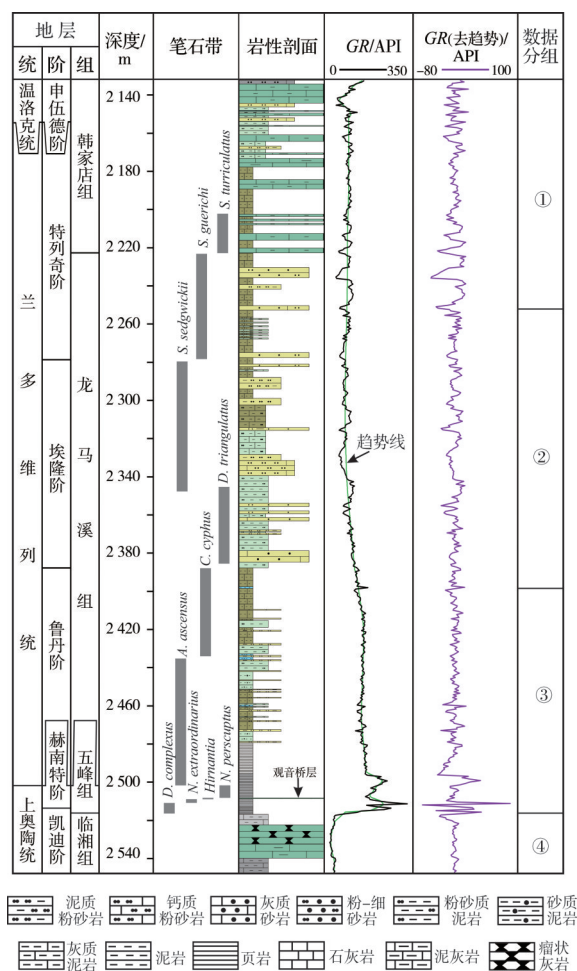


图2 川南地区Y8井岩性综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive lithologic column of Well Y8 in southern Sichuan

## 2 旋回地层学分析

古气候替代性指标主要包括标准采样的地球化学分析数据(如稳定碳氧同位素等)以及地球物理参数(如磁化率、自然伽马、岩石密度等),其中自然伽马能精确反映沉积物中泥质和有机质的含量变化,可作为反映古环境和古气候变化的替代性指标<sup>[17-18]</sup>。基于Y8井GR数据序列,利用Acycle2.0软件进行时间序列分析<sup>[19]</sup>。

### 2.1 频谱分析

首先,对GR数据序列进行线性插值、去极值及去趋势化等预处理。然后,基于多窗口频谱分析方法<sup>[20]</sup>(MTM, multi-taper method)对预处理过的数据序列进行频谱分析,确定各能谱在不同深度的分布特征。

基于Y8井岩性、GR(去趋势)曲线变化趋势,将GR数据序列分为4个典型数据组(图2):①2 132.0~

2 251.3 m, ②2 251.3~2 397.8 m, ③2 397.8~2 515.0 m, ④2 515.0~2 548.0 m。对4组数据分别进行MTM频谱分析(图3),可观察到各数据组均存在置信水平超过99%的显著谱峰:①组中在旋回厚度18.1 m、

10.1 m、2.8 m处(图3a);②组中在旋回厚度20.4 m、5.6 m处(图3b);③组中在旋回厚度5.9 m、2.3 m、1.7 m处(图3c);④组中在旋回厚度7.8 m、6.6 m、3.1 m、2.8 m、2.2 m处(图3d)。

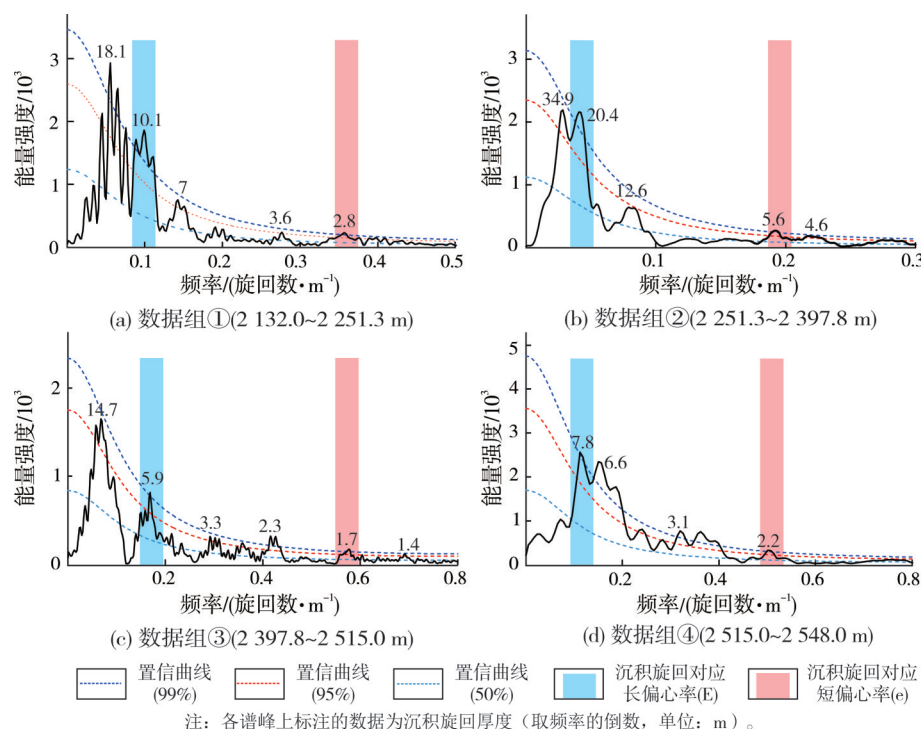


图3 Y8井五峰组—龙马溪组自然伽马曲线MTM频谱分析

Fig. 3 MTM power spectra of untuned GR series of Wufeng Formation–Longmaxi Formation in Well Y8

要判断米兰科维奇旋回在沉积地层中是否存在,最常用的方法是将频谱分析得到的沉积旋回厚度与天文轨道周期参数对比。若对比结果显示两者一致(或误差较小),且依据旋回厚度与天文轨道周期计算出的沉积速率基本符合研究区沉积规律,则表明该套地层存在米兰科维奇旋回,受天文轨道周期控制<sup>[21-22]</sup>。

根据Berger等<sup>[23]</sup>对奥陶纪—志留纪理论天文轨道周期参数的计算,这一时期长偏心率(405 ka)、短偏心率(100 ka)、斜率(40 ka)、岁差(20 ka)的比值为20:5:2:1,其中长、短偏心率的比值为4:1。从前述Y8井4组数据的频谱分析结果看(图3),①组中10.1 m:2.8 m $\approx$ 3.6:1,②组中20.4 m:5.6 m $\approx$ 3.6:1,③组中5.9 m:1.7 m $\approx$ 3.5:1,④组中7.8 m:2.2 m $\approx$ 3.5:1。这4套沉积旋回厚度之比与长、短偏心率的比值(4:1)近似一致,故认为该套地层保存有完好的天文轨道周期记录。

## 2.2 滤波和调谐

对预处理后的数据进行带通滤波处理,获取正

弦波形的天文轨道参数旋回曲线。利用“Age scale”模块将深度域转换为时间域,并进行调谐分析。

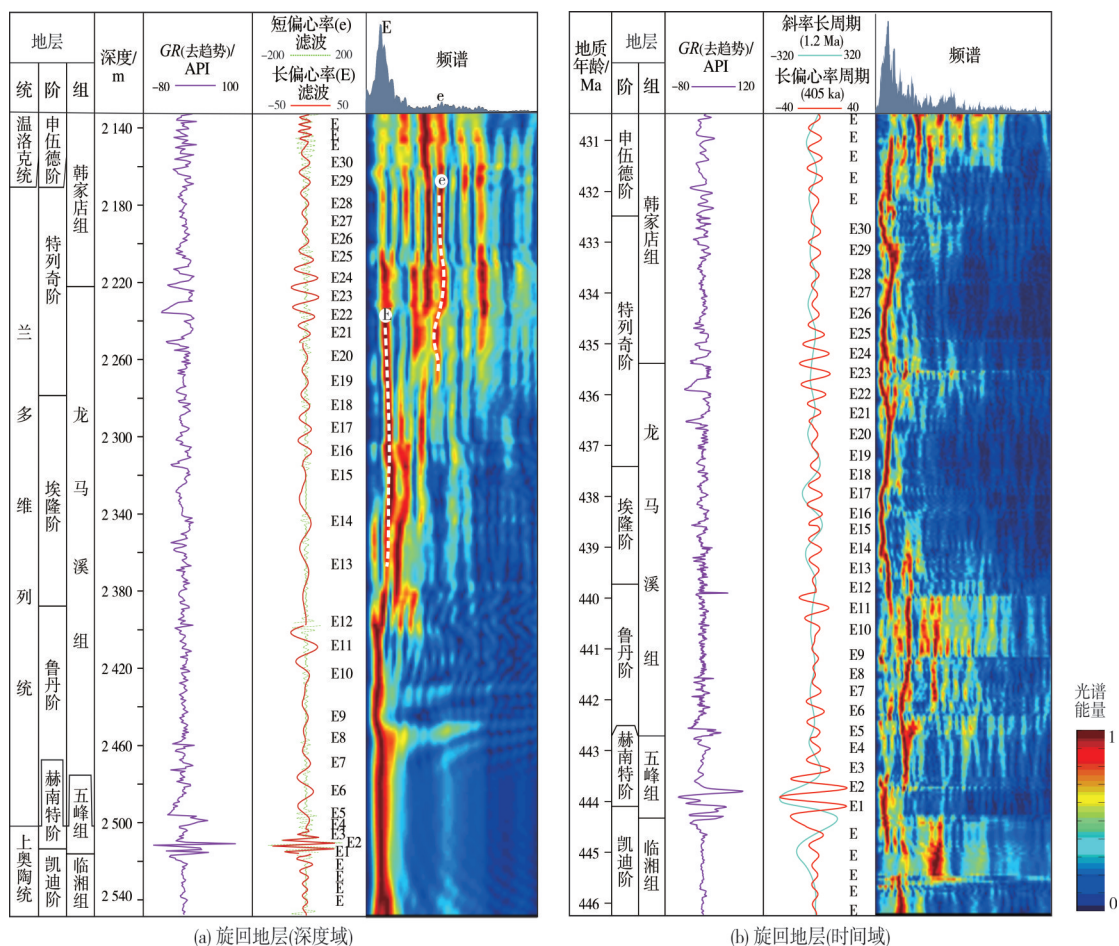
将4组数据识别出的与长、短偏心率对应的沉积旋回厚度分别进行加权平均,结果为11.1 m、3.1 m。对Y8井长偏心率旋回(厚11.1 m)进行带通滤波(频率为 $0.09 \pm 0.004$  旋回数/m),得到37个长偏心率旋回(E)(图4a);对短偏心率旋回(厚3.1 m)进行带通滤波(频率为 $0.32 \pm 0.06$  旋回数/m),得到约135个短偏心率旋回(e)(图4a)。

长偏心率周期(405 ka)是最为稳定的地球轨道参数<sup>[24]</sup>,常作为旋回地层学和天文年代学一个基本的地质计时单位,用来建立“浮动”天文年代标尺。胡艳华等<sup>[25]</sup>测得奥陶系观音桥层顶部斑脱岩的地质年龄为 $443.2 \pm 1.6$  Ma。作者以此为锚点,对长偏心率进行天文标定,建立Y8井晚奥陶世—早志留世年代标尺(图4b)。据此推算:奥陶系与志留系界线处的同位素年龄最佳估算值为 $442.7 \pm 1.6$  Ma,赫南特阶、鲁丹阶、埃隆阶和特列奇阶的持续时间分别为1.4 Ma、3.0 Ma、2.3 Ma、4.9 Ma;凯迪阶与赫南特阶界线年龄为



444.1±1.6 Ma, 赫南特阶与鲁丹阶界线年龄为442.7±1.6 Ma, 鲁丹阶与埃隆阶界线年龄为439.7±1.6 Ma, 埃

隆阶与特列奇阶界线年龄为437.4±1.6 Ma, 特列奇阶与申伍德阶界线年龄为432.5±1.6 Ma。



注: GR序列2 $\pi$  MTM频谱分析及滑动窗口频谱分析: a 图窗口为150 m, b 图窗口为500 ka。

图4 川南地区Y8井五峰组—龙马溪组旋回地层分析结果

Fig. 4 Results of cyclostratigraphy analysis of Wufeng Formation–Longmaxi Formation in Well Y8 in southern Sichuan

### 3 有机质聚集规律

#### 3.1 天文轨道周期对海平面变化的影响

轨道长周期与三级层序具有相关性,三级层序的形成周期时限一般为0.5~3 Ma<sup>[26]</sup>。斜率长旋回(即1.2 Ma周期)的轨道调节作用,是通过地球和火星的天文共振而相互联系并形成<sup>[11]</sup>,其为三级海平面变化旋回的共有周期<sup>[12]</sup>。斜率长周期可作为长偏心率信号的调制周期,影响全球气候和海平面变化<sup>[27]</sup>,其调节作用旋回已经在各种沉积记录中得到识别。基于前述滑动窗口频谱分析、滤波和调谐的结果,以长偏心率周期(405 ka)为基准,对斜率长周期(1.2 Ma)进行天文调谐和滤波(频率为0.0042±0.0002旋回数/ka),得到约13个斜率长旋回(图4b)。

四川盆地五峰组—龙马溪组有机质含量对海平面的升降变化反应敏感,有机质碳同位素( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ )的变化能较好地予以表征。本文开展地球化学分析的样品( $\text{TOC}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 各51件,微量元素共120件)取自Y8井五峰组—龙马溪组下段岩心,岩性主要为黑色页岩、灰质页岩(图5)。从分析结果来看:Y8井五峰组—龙马溪组下段 $\text{TOC}$ 变化较大,为0.29%~6.75%,总体偏高,一般大于2%,平均含量为3.16%,有机质丰度较高; $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 为-32.20‰~-28.07‰,平均为-30.50‰。如图5所示:整体上 $\text{TOC}$ 与微量元素Th和U含量、U/Th、V/Cr、Ni/Co、V/(V+Ni)随深度的变化趋势一致;五峰组灰绿色灰岩层(观音桥层)代表赫南特期的“冰期事件”<sup>[28]</sup>,它与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 发生正漂现象的位置一致。

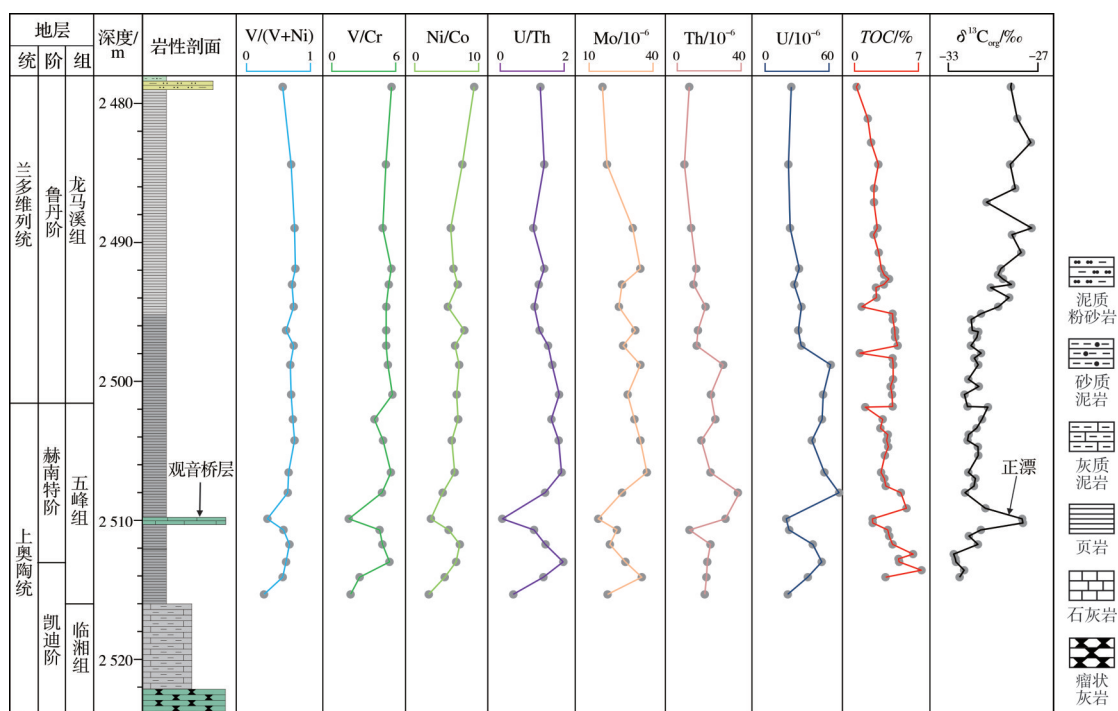


图5 川南地区五峰组—龙马溪组下段微量元素分析

Fig. 5 Analysis of trace elements of Wufeng Formation–lower Longmaxi Formation in Well Y8 in southern Sichuan

结合天文年代标尺,将深度域样品点的  $TOC$ 、 $\delta^{13}C_{org}$  投影到时间域,并根据  $\delta^{13}C_{org}$  的变化绘制出川南地区海平面变化曲线。依据 Loi 等<sup>[29]</sup>、Lu 等<sup>[30]</sup>、Ogg 等<sup>[31]</sup>、Haq 等<sup>[32]</sup>提出的三级层序海平面变化,恢复了晚奥陶世一早志留世全球海平面变化曲线。如图 6 所示:全球海平面变化曲线与斜率长周期(1.2 Ma)曲线的波动趋势基本一致,斜率长周期曲线左偏、右偏分别与海平面上升、下降趋势相对应,两者具有良好的相关性;川南地区海平面变化与全球海平面变化大体一致,局部波动有差别。晚奥陶世一早志留世全球海平面升降变化受斜率长周期控制;轨道周期主要通过直接影响气候变化,导致两极冰川的消融及冰盖的形成,进而影响全球海平面的变化。

### 3.2 天文轨道周期对沉积环境的影响

天文轨道周期主要通过控制海平面的升降来影响沉积环境,而海洋生产力、有机质保存条件与沉积环境紧密相关。地球化学示踪是反映古环境氧化-还原条件的有效手段,其中微量元素指标已广泛应用于沉积环境分析<sup>[33-35]</sup>,如 U/Th、V/Cr、Ni/Co 和 V/(V+Ni) 可作为古氧化-还原环境的判别标志<sup>[36]</sup>(表 1)。

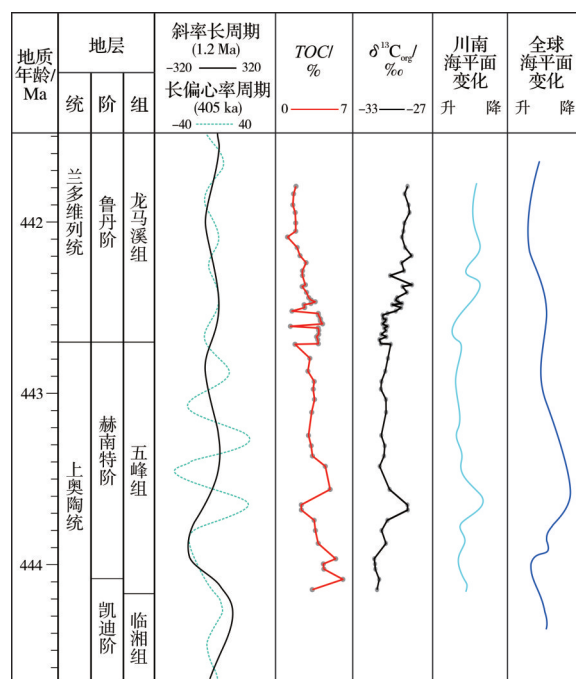


图6 川南地区晚奥陶世—早志留世天文轨道周期与海平面变化(全球海平面变化据文献[29–32])

Fig. 6 Late Ordovician–Early Silurian astronomical orbital period and sea level change in southern Sichuan (global sea change cited from reference [29–32])

对川南地区Y8井五峰组—龙马溪组下部微量元素指标与TOC进行交会,并标出表1的各界限值(图7),可分析不同地质时期沉积环境的氧化-还原

程度。如图7所示,除观音桥层沉积时期发育常氧环境外,其他地质时期多处于贫氧—缺氧环境。

表1 氧化—还原环境的微量元素判别<sup>[36]</sup>

Table 1 Identification of trace elements in redox environment (cited from reference [36])

判别参数	常氧环境	贫氧环境	缺氧环境
U/Th	<0.75	0.75~1.25	>1.25
Ni/Co	<5	5~7	>7
V/Cr	<2	2~4.25	>4.25
V/(V+Ni)	<0.45	0.45~0.54	>0.54

### 3.3 天文轨道周期控制下的有机质聚集模式

综合全球重大地质事件和天文轨道周期特征以及对古氧化—还原环境的恢复,建立了川南地区晚奥陶世—早志留世有机质聚集模式。

凯迪晚期,斜率长周期曲线左偏(图6),地球极地接收太阳辐射量增加,气候变暖,冰川消融,全球海平面上升;扬子区沉积环境由浅海转变为深海,海洋水体出现分层,表层生产力增强,底部水体因

为氧循环不足而出现缺氧环境(图7),有机质得到较好保存,TOC较高。

赫南特早期,斜率长周期曲线继续左偏之后转为右偏,地球极地接收太阳辐射量由缓慢增加转变为急剧减少,气候骤然变冷,冰川开始大量形成,例如全球最大的冈瓦纳大陆冰川(赫南特冰期事件)<sup>[37-38]</sup>,全球海平面从缓慢上升转变为快速下降;上扬子区早期形成的碳酸盐台地出露水面而被风化,使得浅海中富重同位素的碳元素输入量增加,观音桥层有机质碳同位素出现显著的正漂移现象(图6)。观音桥层沉积时期,水体溶氧能力增强,处于常氧状态(图7),海洋表层生产力下降,不利于有机质的形成与保存,TOC显著降低。赫南特晚期,长斜率周期曲线左偏(图6),地球极地接收太阳辐射量增加,冰川融化,全球海平面逐渐上升;川南地区沉积环境由浅海转变为半深海,表层生产力加强,溶氧能力下降,处于贫氧—缺氧环境(图7),有利于有机质的保存,有机质含量增加。

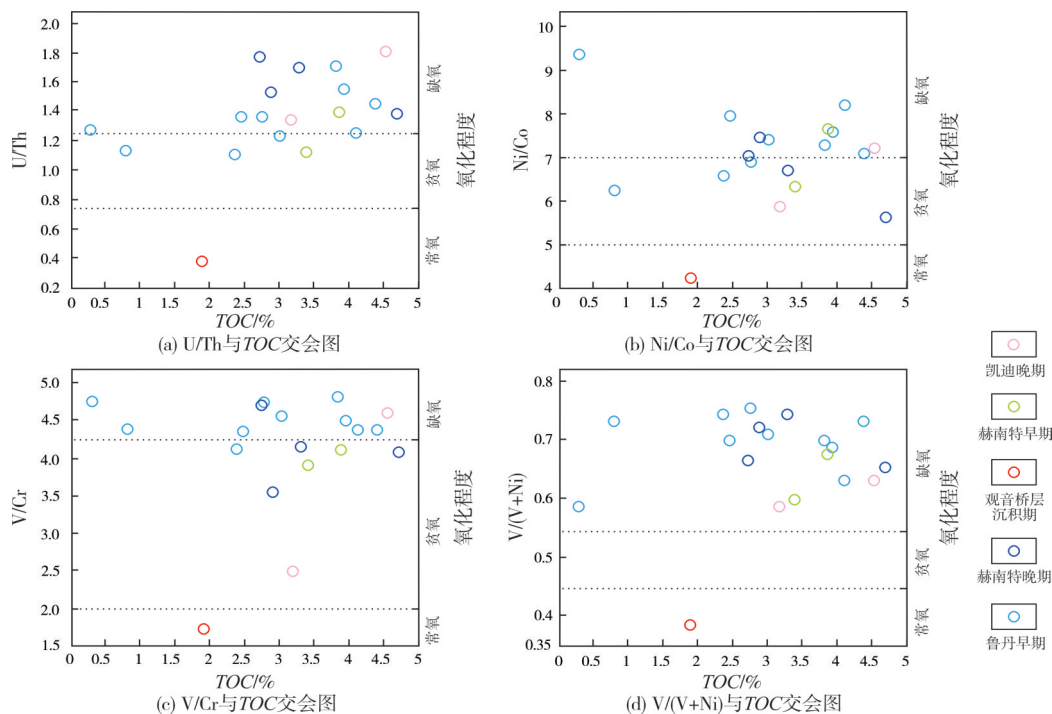


图7 川南地区Y8井五峰组—龙马溪组下段微量元素指标与TOC交会图及氧化—还原程度判别

Fig. 7 Crossplots of trace element parameters and TOC and the identification of oxidation-reduction degree of Wufeng Formation—lower Longmaxi Formation in Well Y8 in southern Sichuan

鲁丹早期,斜率长周期曲线左偏,地球极地接收太阳辐射量增加,全球气候快速变暖,形成于赫南特期的冰川迅速消融,全球海平面上升;上扬子区发生大面积海侵<sup>[39]</sup>,川南地区沉积环境由半深海

逐渐转变为深海,古陆氧化面积减小,因侵蚀作用而进入海洋的有机碳量相应减少,使得溶于海水中的CO<sub>2</sub>富<sup>13</sup>C,导致同海水相平衡的碳酸盐岩的δ<sup>13</sup>C值相应增加(图6),同时海洋底部水体滞留而形成



缺氧环境,有利于有机质的保存。鲁丹中后期,伴随着大规模淡水的注入,有机质稀释作用增强,不利于有机质的富集,TOC有逐渐降低的趋势(图6)。

基于旋回地层学分析,可将全球海平面变化与天文轨道周期相联系,从而建立起轨道周期间接控制水体氧化-还原条件的有机质富集模式:斜率长周期(1.2 Ma)驱动全球海平面上升,海洋水体为贫氧—缺氧环境,有机质因保存条件好而富集程度高;斜率长周期驱动全球海平面下降,海洋水体为常氧—贫氧环境,有机质因保存条件差而富集程度低。

## 4 结 论

(1)川南地区Y8井五峰组—龙马溪组的旋回地层学分析结果表明,天文轨道周期对研究区沉积过程有明显的影响。根据长偏心率(405 ka)滤波调谐结果,以观音桥层顶部斑脱岩(奥陶系与志留系界线处)U-Pb定年结果 $443.2 \pm 1.6$  Ma为锚点,建立了Y8井的天文年代标尺。

(2)根据Y8井五峰组—龙马溪组有机质碳同位素变化恢复了川南地区古海平面变化曲线,它与晚奥陶世—早志留世全球海平面变化大体上具有一致性。全球海平面升降趋势与斜率长周期(1.2 Ma)曲线波动趋势相关性好,受斜率长周期的控制。

(3)天文轨道周期主要通过控制海平面的升降间接影响沉积水体的氧化-还原条件,进而控制页岩有机质富集程度:当全球海平面上升,底部水体因为氧循环不足而形成贫氧—缺氧环境,有机质富集;当全球海平面下降,水体溶氧能力增强,水体底部出现常氧—贫氧环境,不利于有机质的保存。川南地区凯迪早期、赫南特晚期、鲁丹早期半深海—深海环境有利于有机质的形成和保存;观音桥层沉积期浅海环境不利于有机质的形成和保存。

## 参 考 文 献

- [1] 腾格尔,申宝剑,俞凌杰,等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气形成与聚集机理[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 69–78.
- [2] SAGEMAN B B, MURPHY A E, WERNE J P, et al. A tale of shales: the relative roles of production, decomposition, and dilution in the accumulation of organic-rich strata, Middle - Upper Devonian, Appalachian Basin[J]. Chemical geology, 2003, 195(1): 229–273.
- [3] PEDERSEN T F, CALVERT S E. Anoxia vs. productivity: what controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks?[J]. AAPG bulletin, 1990, 74(4): 454–466.
- [4] 腾格尔,高长林,胡凯,等. 上扬子东南缘下组合优质烃源岩发育及生烃潜力[J]. 石油实验地质, 2006, 28(4): 359–365.
- [5] MORT H, JACQUAT O, ADATTE T, et al. The Cenomanian/Turonian anoxic event at the Bonarelli Level in Italy and Spain: enhanced productivity and/or better preservation? [J]. Cretaceous research, 2007, 28(4): 597–612.
- [6] ARTHUR M A, SAGEMAN B B. Marine black shales: depositional mechanisms and environments of ancient deposits [J]. Annual review of earth and planetary sciences, 1994, 22(1): 499–551.
- [7] 王清晨,严德天,李双建. 中国南方志留系底部优质烃源岩发育的构造-环境模式[J]. 地质学报, 2008, 82(3): 289–297.
- [8] 王淑芳,董大忠,王玉满,等. 四川盆地南部志留系龙马溪组富有机质页岩沉积环境的元素地球化学判别指标[J]. 海相油气地质, 2014, 19(3): 27–34.
- [9] 吴怀春,张世红,冯庆来,等. 旋回地层学理论基础、研究进展和展望[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2011, 36(3): 409–428.
- [10] VAIL P R, MITCHUM R M, THOMPSON S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 4: global cycles of relative changes of sea level[M]// PAYTON C E. Seismic stratigraphy: applications to hydrocarbon exploration. AAPG memoir 26, 1977: 63–81.
- [11] LASKAR J. The chaotic motion of the solar system: a numerical estimate of the size of the chaotic zones [J]. Icarus, 1990, 88(2): 266–291.
- [12] BOULILA S, GALBRUN B, MILLER K G, et al. On the origin of Cenozoic and Mesozoic “third-order” eustatic sequences [J]. Earth science reviews, 2011, 109(3/4): 94–112.
- [13] 刘树根,徐国盛,徐国强,等. 四川盆地天然气成藏动力学初探[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(4): 323–330.
- [14] 牟传龙,周恩恩,梁薇,等. 中上扬子地区早古生代烃源岩沉积环境与油气勘探[J]. 地质学报, 2011, 85(4): 526–532.
- [15] 梁狄刚,郭彤楼,边立曾,等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(三): 南方四套区域性海相烃源岩的沉积相及发育的控制因素[J]. 海相油气地质, 2009, 14(2): 1–19.
- [16] 陈旭,樊隽轩,张元动,等. 五峰组及龙马溪组黑色页岩在扬子覆盖区内的划分与圈定[J]. 地层学杂志, 2015, 39(4): 351–358.
- [17] ABELS H A, AZIZ H A, KRIJGSMAN W, et al. Long-period eccentricity control on sedimentary sequences in the continental Madrid Basin (middle Miocene, Spain) [J]. Earth and planetary science letters, 2010, 289(1/2): 220–231.
- [18] WONIK T. Gamma-ray measurements in the Kirchrode I and II boreholes [J]. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 2001, 174(1/3): 97–105.
- [19] LI Mingsong, HINNOV L, KUMP L. Acycle: time-series analysis software for paleoclimate research and education [J]. Computers and geosciences, 2019, 127: 12–22.
- [20] THOMSON D J. Spectrum estimation and harmonic analysis [J]. Proceedings of the IEEE, 1982, 70(9): 1055–1096.
- [21] HINNOV L A. New perspectives on orbitally forced stratigraphy [J]. Annual review of earth and planetary sciences, 2003, 28: 419–475.
- [22] WEEDON G. Time-series analysis and cyclostratigraphy [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 1–259.
- [23] BERGER A, LOUTRE M F, LASKAR J, et al. Stability of the

- astronomical frequencies over the earth's history for paleoclimate studies[J]. *Science*, 1992, 255: 560–566.
- [24] 黄春菊. 旋回地层学和天文年代学及其在中生代的研究现状[J]. *地学前缘*, 2014, 21(2): 48–66.
- [25] 胡艳华, 周继彬, 宋彪, 等. 中国湖北宜昌王家湾剖面奥陶系顶部斑脱岩 SHRIMP 锆石 U–Pb 定年[J]. *中国科学: D 辑 地球科学*, 2008, 38(1): 72–77.
- [26] GRADSTEIN F M, OGG J G, HILGEN F J, et al. On the geologic time scale[J]. *Newsletters on stratigraphy*, 2012, 45(2): 171–188.
- [27] 梅冥相. 从沉积层序到海平面变化层序: 层序地层学一个重要的新进展[J]. *地层学杂志*, 2015, 39(1): 58–73.
- [28] 杨向荣, 严德天, 张利伟, 等. 赫南特冰期古海洋环境转变及其成因机制研究现状[J]. *沉积学报*, 2018, 36(2): 108–121.
- [29] LOI A, GHENNE J F, DABARD M P, et al. The Late Ordovician glacio-eustatic record from a high-latitude storm-dominated shelf succession: the Bou Ingarf section (Anti-Atlas, Southern Morocco) [J]. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 2010, 296(3/4): 332–358.
- [30] LU Yangbo, HUANG Chunju, JIANG Shu, et al. Cyclic late Katian through Hirnantian glacioeustasy and its control of the development of the organic-rich Wufeng and Longmaxi shales, South China [J]. *palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 2019, 526: 96–109.
- [31] Ogg J G, Ogg G M, Gradstein F M. A concise geologic time scales: 2016[M]. Amsterdam: Elsevier, 2016: 234–240.
- [32] HAQ B U, SCHUTTER S R. A chronology of Paleozoic sea-level changes[J]. *Science*, 2008, 322: 64–68.
- [33] JONES B, MANNING D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical geology*, 1994, 111(1/4): 111–129.
- [34] 李季林, 张廷山, 梁兴, 等. 笔石与页岩有机质的富集关系及其贡献率: 以四川盆地南缘 YS118 井为例[J]. *天然气工业*, 2019, 39(12): 40–45.
- [35] 郑一丁, 雷裕红, 张立强, 等. 鄂尔多斯盆地东南部张家滩页岩元素地球化学、古沉积环境演化特征及油气地质意义[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(7): 1395–1404.
- [36] 张春明, 张维生, 郭英海. 川东南—黔北地区龙马溪组沉积环境及对烃源岩的影响[J]. *地学前缘*, 2012, 19(1): 136–145.
- [37] BRECHLEY P J, MARSHALL J D, CARDEN G A F, et al. Bathymetric and isotopic evidence for a short-lived Late Ordovician glaciation in a greenhouse period [J]. *Geology*, 1994, 22(4): 295.
- [38] FINNEGAN S, BERGMANN K D, EILER J M, et al. The magnitude and duration of Late Ordovician–Early Silurian glaciation[J]. *Science*, 2011, 331: 903–906.
- [39] 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及沉积环境[J]. *海相油气地质*, 2006, 11(3): 49–54.

编辑:董庸

## Organic matter enrichment in Wufeng Formation–Longmaxi Formation in southern Sichuan: based on cyclostratigraphy

XIAO Qiang, ZHANG Tingshan, ZHANG Xi, LI Hongjiao, YONG Jinjie, LIU Yulong, LI Xiaoyu

**Abstract:** Based on drilling and logging data, the law of organic matter accumulation in shale of Wufeng Formation and Longmaxi Formation in southern Sichuan was studied with cyclostratigraphic and geochemical methods. According to the GR series of Well Y8, the cyclostratigraphy of the Late Ordovician Wufeng Formation–Early Silurian Longmaxi Formation was studied. The long slope period (1.2 Ma), long eccentricity period (405 ka), and short eccentricity period (100 ka) signals recorded in sediments were identified, and the astronomical time scales floating in this geological history period were established. Geochemical analysis shows that the total organic carbon content (TOC) at the bottom of the Wufeng Formation–Longmaxi Formation is relatively high, with an average content of 3.16%, and becomes lower and tends to be stable upward. Combining organic carbon isotopes ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ) and trace element ratios such as U/Th, V/Cr, Ni/Co, V/(V+Ni), the sea level change and paleo-ocean sedimentary environment in Late Ordovician–Early Silurian were restored in southern Sichuan. The long slope period (1.2 Ma) has a good correlation with the trend of global sea level change in Late Ordovician–Early Silurian. The accumulation of organic matter in Wufeng Formation–Longmaxi Formation in southern Sichuan is closely related to the long-term fluctuation of sea level driven by the long slope period and the redox condition of water body: the sea level rises in the early Katian, late Hirnantian, and early Rhuddanian in southern Sichuan, and the semi deep–deep sea environment is favorable for the formation and preservation of organic matter; during the deposition of Guanyinqiao carbonate strata, the sea level dropped, and the shallow sea environment was not conducive to the formation and preservation of organic matter.

**Key words:** astronomical orbital period; sea-level change; paleo-environment; organic matter accumulation; Wufeng Formation; Longmaxi Formation; southern Sichuan

**XIAO Qiang**, First author: Master candidate at Southwest Petroleum University, engaged in cyclostratigraphy and petroleum geology. Add: No. 8 Xindu Avenue, Xindu District, Chengdu, Sichuan 610500, China

**ZHANG Tingshan**, Corresponding author: Professor, mainly engaged in sedimentary geology. Add: No. 8 Xindu Avenue, Xindu District, Chengdu, Sichuan 610500, China