黔西南下石炭统打屋坝组页岩的天文旋回识别及层序地层划分

王嘉伟[1a,1b]，金思丁[1a,1b*]，魏祥峰[2]，郝景宇[2]，陈义才[1a,1b]，李露艳[1a,1b]，马超[1b,1c]

1. 成都理工大学 a. 能源学院；b. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室；c. 沉积地质研究院，成都 610059；
2. 中国石化勘探分公司，成都 610059

第一作者，E-mail：1091924996@qq.com

* 通信作者，E-mail：jinsiding@cdut.edu.cn

2023-09-26 收稿；2023-10-24 修回；2024-01-18 接受

基金项目：国家自然科学基金项目(42172137)

中图分类号：P618.13　　文章编号：2096-8523(2025)04-0288-16　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230546

摘　要：黔西南下石炭统打屋坝组发育了一套极具勘探潜力的页岩地层。目前，关于该套地层的层序划分方案和层序发育机制存在分歧，一定程度制约了该套优质页岩空间展布规律的认识。选取黔西南黔水地 1 井下石炭统打屋坝组(1 457 ~ 2 466 m)页岩为研究对象，以自然伽马测井曲线为替代指标，采用时间序列分析、合成预测误差滤波分析(INPEFA)和小波分析等方法，开展旋回地层学分析与层序地层学研究，旨在从天文旋回的角度，实现对该套页岩的层序地层“定量”划分。研究表明，黔西南下石炭统打屋坝组页岩地层记录了天文周期信号，相关系数法(COCO)估算显示其最优沉积速率为 16.4 cm/ka，对应 405 ka 长偏心率周期的 66.42 m 沉积厚度。对黔水地 1 井 GR 分段(1 457 ~ 1 932 m 和 1 932 ~ 2 466 m)进行频谱分析和天文检验，上段和下段的最优沉积速率分别为 16.5，11.2 cm/ka，打屋坝组一共记录了 19 个长偏心率周期，建立了“浮动”天文年代标尺，估算持续时限约 7.86 Ma。通过沉积噪音模型(DYNOT 和 ρ1)恢复了相对海平面变化曲线。在旋回地层学研究建立的时间框架基础上，结合相对海平面极值、INPEFA 和小波分析，识别了 6 个三级层序界面，划分出 5 个三级层序，并认为三级层序的发育受控于稳定的约 1.2 Ma 斜率振幅调制周期。应用旋回地层学开展了黔西南打屋坝组页岩地层的层序划分，探讨不同时间尺度下天文轨道参数与相对海平面变化的关系，实现了三级及四级层序地层的划分。该方法为海相页岩万年时间尺度的等时对比提供了可能，可为页岩油气勘探中优质烃源岩发育层段的预测提供精细的年代框架，进而为页岩油气勘探提供理论指导。

关键词：旋回地层学；时间序列分析；层序地层学；海平面变化；斜率调幅；页岩；黔西南

早石炭世是从中古生代温室期向晚古生代冰室期(LPIA)过渡的关键时期，期间全球发生了众多重要的生物演变和环境变化事件[1]。这一时期的冰川活动始于杜内期[2-3]，前人在南美洲、北美洲和欧洲发现了冰川沉积物[4]和锶的正偏移[5]等地质证据。特别在华南低纬度地区，下石炭统打屋坝组发育了多套富有机质页岩地层[6]，且页岩发育连续，持续时间较长，是记录沉积盆地古气候与古环境变化的理想载体[7-8]。

近期研究表明，天文驱动对地球古气候的影响已在大多数古生代沉积记录中得到了证实[9-10]，为深入了解细粒沉积物(页岩、泥岩和粉砂岩)的沉积过程及古气候的变化[11]，众多学者针对中国南方古生界页岩开展了旋回地层学研究，例如下寒武统筇竹

著录信息：王嘉伟，金思丁，魏祥峰，等. 黔西南下石炭统打屋坝组页岩的天文旋回识别及层序地层划分 [J]. 地质科技通报，2025，44(4)：288-303.
WANG Jiawei, JIN Siding, WEI Xiangfeng, et al. Orbital cycle recognition and sequence stratigraphic division of the Lower Carboniferous Dawuba Formation shales in Southwest Guizhou[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(4): 288-303.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

寺组页岩[12]和下志留统龙马溪组页岩[13]。贵州地区下石炭统打屋坝组页岩地层作为富有机质的重要地层，以其厚度大且连续的页岩沉积特点，成为识别米兰科维奇周期的理想对象。尽管如此，对早石炭世旋回地层学的研究目前仍然相对不足[14]。

层序地层学已广泛应用于海相和陆相盆地的油气勘探[15-16]。其核心是探索沉积岩中不同时间尺度的高频层序层级样式[17]。层序地层学中，气候变化引起的海平面波动主要受四级和五级层序控制[18]，而受构造和冰川作用影响的海平面升降则是三级层序发育的关键。通过最大海泛面(maximum flooding surface，简称 MFS)可以识别海侵和海退体系域。在代表海平面最高高度的最大海泛面处，沉积速率相对最低；层序边界即相对海平面最低处，沉积速率相对最高[19]。由于深水地区发育泥页岩等细粒沉积物，沉积连续且沉积速率较稳定，无不整合面，很难通过常规测井或地震反射特征识别相应的层序边界[20-21]。因此，传统层序地层学应用于富有机质页岩的层序划分与对比中具有局限性[22]。高频层序如四级、五级和六级层序可对应到与偏心率、斜率和岁差周期 3 个参数周期相关的轨道周期[23-24]。BOULILA 等[25]提出了三级海平面变化层序(third-order eustatic sequence)的概念，并将海平面变化层序进一步划分为冰室效应层序和温室效应层序。在冰室效应时期，三级层序与地轴斜率调节作用旋回存在成因联系，其周期约为 1.2 Ma，而在温室效应时期，三级层序在某种程度上与偏心率调节作用旋回相对应，周期约为 2.4 Ma。将三级层序的形成归因为冰川型海平面变化的结果，目前已被大多数学者所接受，GONG 等[26]发现，在中二叠世冰室期，全球和当地三级海平面层序的持续时间与 s4-s3(地球与火星之间的引力关系所代表的周期)的斜率调幅周期相匹配。刘洋[27]认为全球海平面振荡与古近纪冰室期 1.2 Ma 斜率调幅周期相吻合。三级海平面变化层序的提出，是近年来层序地层学的一个重要进展，特别是在旋回界面的识别和旋回韵律性的研究方面，体现了旋回地层学和层序地层学的交融，是对层序地层学概念体系中定义欠完整的“准层序”的良好补充。由此可见，旋回地层学研究可以提高层序地层学的分辨率，精确获得万年级别的等时年代框架；层序地层学框架内的旋回地层学研究亦可以丰富研究剖面/钻井的地层学和沉积学内容。

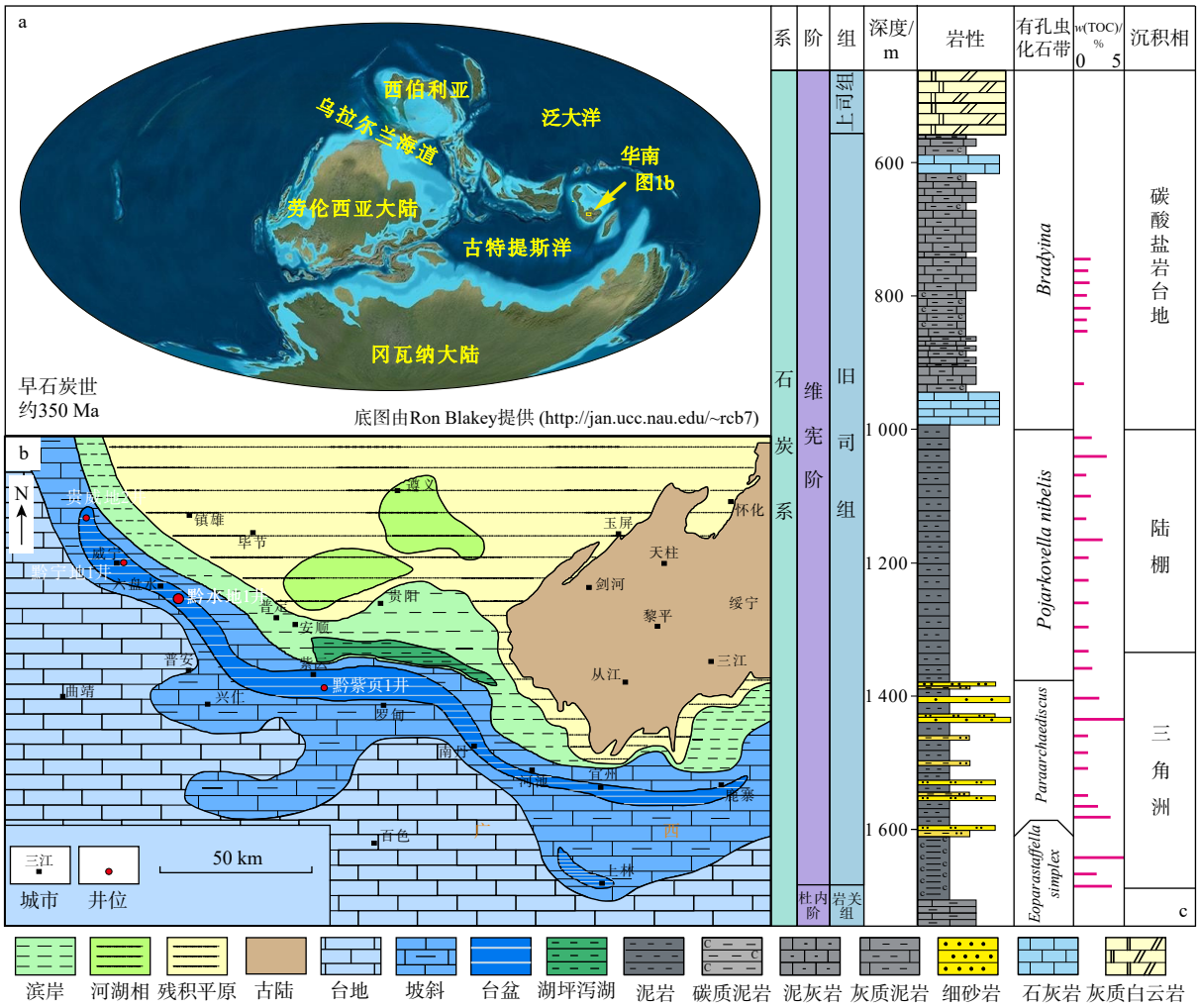
基于层序地层在其理论的合理性和应用上的多样性，不同学者存在认识上、理解上的不同，特别是层序级别和单元数量上的认识差别较大，导致黔西南地区下石炭统打屋坝组层序地层的划分不统一：卢树藩等[28]选取黔西南地区代页 1 井为研究对象，从岩性变化的角度将打屋坝组自上而下划分了 3 个三级层序，第一段至第二段的岩性特征以页岩夹深灰色薄层硅质岩向泥岩的变化，标志着海侵的发生，第二段至第三段为泥岩向深灰色、灰黑色泥灰岩的过渡，标志着海退的发生；郑逢赞等[29]同样根据岩性指示的海平面变化特征将黔水地 1 井、黔紫页 1 井等 4 口钻井的打屋坝组划分为 3 个三级层序；陈相霖等[30]选取黔水地 1 井为研究对象，依据岩性特征、测井响应特征及区域地质资料等，将打屋坝组划分为 4 个三级层序。而国际上同期地层三级层序划分数量则更多，BAYET-GOLL 等[31]在维宪阶早期厄尔布尔士盆地的穆巴拉克组通过已经识别的沉积相、整个平台高频旋回的叠加样式以及相关费舍尔图上识别的主要调节事件划分了 6 个三级层序，说明层序地层在实践中对解释沉积记录还有待完善。而天文校准是等时地层对比的有效方式，可用于富有机质页岩的高分辨率地层划分和对比。

本研究以黔水地 1 井打屋坝组页岩地层为研究对象，利用测井 GR 资料开展了旋回地层学研究，并实现了等时层序地层“定量”划分：(1)识别黔西南地区下石炭统页岩地层中记录的天文周期信号；(2)通过建立“浮动”地质天文年代标尺，约束打屋坝组沉积时限；(3)结合 INPEFA 分析和小波分析实现在天文年代框架下的层序地层划分；(4)基于沉积噪音模型重建相对海平面变化曲线，探寻长斜率天文周期(约 1.2 Ma)与三级层序发育机制的关系，并为今后对该地区的层序地层划分提供一种切实可行的思路与方法。

1 区域地质背景

1.1 古地理环境

在早石炭世的杜内期，华南地块处于亚赤道或赤道地区，被古特提斯洋淹没(图 1a)。该地块包含深水盆地、浅水碳酸盐岩台地、华夏陆块、上扬子陆块等多个亚单元[32]。早石炭世是从古生代中期温室气候向晚古生代冰期过渡的重要时间节点，特别在杜内期的中期和维西斯期有 2 次短暂的冰川事件[33-34]，展示了短期冰川脉冲与频繁的全球海平面变化之间的一致性，对后续层序地层和旋回地层学研究具有深远意义。笔者所研究的打屋坝组就处于华



a. 早石炭世全球古地理图; b. 黔西南地区下石炭统沉积相; c. 黔西南地区下石炭统旧司组生物地层柱状图

图 1　区域地质图

Fig. 1　Regional geological map

南板块的早石炭世维宪期[34]。

打屋坝组最初是由吴祥和[35]在长顺睦化镇以北约 600 m 的睦化村打屋坝命名，其典型岩性特征为厚约 100 m 的灰黑色泥页岩，夹有硅质岩和透镜体状泥灰岩。黔西南地区下石炭统打屋坝组主要分布于“垭都–紫云–罗甸”裂陷槽的西南侧。在泥盆纪的末期因为紫云运动的影响，致使除威宁、六盘水等黔西南地区仍保持着深水盆地连续沉积外，其余地区都出现一定程度的隆升和剥蚀现象。进入早石炭世的摆佐时期，海侵规模达到了最大，之后除深水盆地外，浅海台地开始出现不同程度的海退现象。至此，在石炭纪该地区以浅海相碳酸盐岩为主，沉积环境属于半封闭滞留砂泥质台地–台盆沉积(图 1b)。另外由于下石炭统旧司时期高等植物的大量发育，为该时期富有机质页岩的沉积提供了丰富的物质基础。旧司组主要分布在威宁、盘县、水城一带，往南至罗甸–长顺–紫云一带相变成为打屋坝组，该组地层分布范围较广，沉积厚度为几百甚至上千米[36-37]。

1.2　地层框架

侯鸿飞等[38]将睦化组的上覆地层称为打屋坝组，时代划属大塘阶。季强等[39-40]正式启用打屋坝组。前人针对黔西南地区的石炭系层位定年问题也做了大量的研究，例如：利用古生物化石(有孔虫化石带)判断出旧司组处于石炭系维宪阶的底部。石炭纪浅水沉积的有孔虫演化快、分布范围广、数量极其丰富、分异度高，对于地层的划分对比具有极其重要的意义。全球维宪阶底界就是以有孔虫 *Eoparastaffella sim plex* 的首现定义的，并且自下而上命名了 7 个有孔虫化石带，可与全球其他典型的石炭纪沉积区的有孔虫生物地层进行良好的对比。前人[41]在旧司组也发现了跟维宪阶下部类似的有孔虫化石(*Pojarkovella nibelis*、*Eostaffella* 等)，认为黔南上司地区旧司组与

维宪阶下部对应。根据旧司组与打屋坝组的对应关系，确定打屋坝组底界面与维宪阶底界面对应，顶界年代处于维宪阶中部[42]（图 1c）。在黔西南紫云地区，打屋坝组地层发育了一套整合于睦化组灰岩之上和南丹组碳酸盐岩之下的斜坡–盆地相黑色黏土（页）岩夹少量硅质岩（图 2）[44]。

2 数据与方法

2.1 自然伽马曲线及其气候意义

测井曲线是岩石物理学、地层岩石学、岩石地球化学特征的综合反映。由于其连续性良好和纵向分辨率高，测井曲线成为了研究古气候变化的有效工具[45]。本研究选取黔水地 1 井的自然伽马（GR）测井数据为时间序列分析的替代指标。*GR* 值指示了岩石中的放射性元素钾、铀和钍的含量。具体表现在泥页岩中的黏土矿物对放射性元素钾、铀和钍等具有很强的吸附性，泥质含量越多，放射性元素含量越大，则放射性越强。碳酸盐岩对放射性元素吸附作用则很小。GR 测井曲线反映了地层放射性强度的变化，间接反映了对应地层的泥质含量[46]，*GR* 值已被证实是有效的古气候替代指标，能够指示海相和陆相地层的古气候和古环境变化[47]，并且在旋回地层学研究中得到了广泛应用[48-50]。

2.2 INPEFA 和小波变换

基于最大熵谱（maximum entropy spectral analysis，简称 MESA）合成的合成预测误差滤波分析（INPEFA）曲线技术和多尺度小波分析技术已被一些研究者结合应用于层序地层研究中[51-52]。INPEFA 技术的核心思想是利用 MESA 的估计原理来计算测井曲线的预测误差，再根据预测误差分析出预测误差趋势。这些预测误差趋势曲线的正负转折点，可能代表层序界面或洪泛面的位置[53]。DJINNIO 等[54]结合 MESA 分析，形成了 PEFA（预测误差滤波分析）曲线及其综合 INPEFA 曲线。该技术提供了一种半自动定量等时层序地层对比方法，并已在实践中取得了一定的应用成效[55]。

小波变换技术因其多分辨率的特点而特别适合时域和频域的局部特征分析。模拟采用由粗到细的层序单元人工划分方法[56]。小波变换中的尺度因子（*a*）与信号的周期分量呈正相关关系：*a* 越大，周期分量越长，观察窗口也越大，表明该信号对应地层的旋

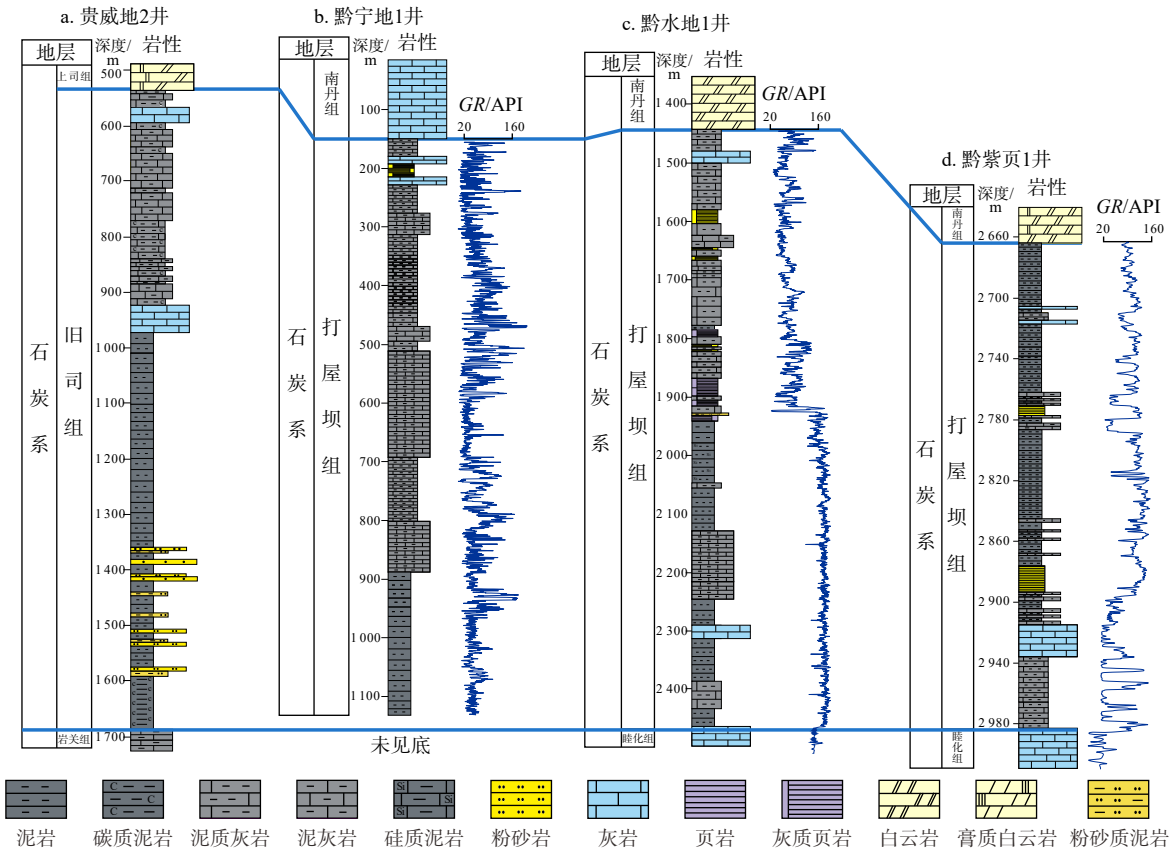


图 2 垭都–紫云–罗甸断裂带井间地层格架对比[43]

Fig. 2 Inter-well stratigraphic framework correlation in the Yadu-Ziyun-Luodian fault zone

回厚度大、沉积周期长，可以作为层序划分的依据；相反 a 越小，则对应旋回厚度小、沉积周期短的地层，可以作为准层序等划分的依据。为了更好地显示多尺度信号信息，研究提取了 3 个小波系数条不同尺度的曲线：a=64（高频），a=256（中频），a=512（低频）。小波变换的多尺度分析思想及多分辨率特征克服了傅里叶分析分辨率单一以及无法反映时域和频域局部特征的局限。因此，在测井信号分析中，它能在不同的尺度上揭示沉积旋回信息的能量水平，从而用于识别岩性变化[57]。

2.3　时间序列分析

时间序列是指按照一定顺序（深度、时间、旋回序数等）从地层中获得包含气候、环境等变化信息的序列[58]。利用数字信号处理技术对这种序列进行定量分析的方法则为时间序列分析法。具体操作包括插值、去趋势化、频谱分析、相关系数分析、滤波、天文调谐等[59-60]。以上操作均在 Acycle 2.6 软件（基于 matlab 软件平台）中完成。

首先对 GR 数据进行预处理，包括插值和整段 15%（151.35 m）的去趋势化处理。然后对预处理过后的 GR 数据进行频谱分析（multi taper method，简称 MTM）和快速傅里叶变化（fast fourier transform，简称 FFT）的滑动频谱分析，滑动窗口设定为 100 m，滑动步长为 1 m，识别出频率随深度的变化情况。为了进一步评估不同深度下沉积速率的变异性，根据石炭系的年代确定了各天文参数的周期比值，使用相关系数（COCO）方法客观确定最佳沉降速率和进化相关系数（eCOCO）方法跟踪随深度变化的沉降速率，最优沉积速率范围设置为 1 ~ 20 cm/ka，间距为 0.05 cm/ka，蒙特卡洛模拟计算次数设置为 2 000 次。滑动频谱分析和天文检验等方法能起到互相验证的作用[61]。最后基于频谱分析的结果，将 405 ka 对应的厚度周期通过高斯带通滤波提取出来，用于后续的天文调谐和斜率调幅分析。

2.4　调谐与调幅

天文调谐的核心是将地层中提取的旋回周期与目标天文曲线进行对比[62]，实现从深度域到时间域的转换，并建立具有绝对年龄的地质年代标尺–天文年代标尺（astronomical time scale，简称 ATS）。然而古生代地层没有与之对应的目标天文曲线，但 405 ka 长偏心率周期（地质的“钟摆”）在地质历史时期保持稳定，可以基于 405 ka 的目标周期对沉积地层的滤波曲线进行调谐，并与地层中的时间锚点相结合，建立“浮动”的地质天文年代标尺[63]。此外，通过对时间域序列的调幅分析，判断长周期对短周期的调制作用：首先对时间序列进行斜率频带的滤波，进而将滤波结果的包络线进行频谱分析，提取约 1.2 Ma 的超长斜率周期。调幅分析可以判断观察到的旋回是否受天文轨道控制[64-65]。

2.5　沉积噪音模型

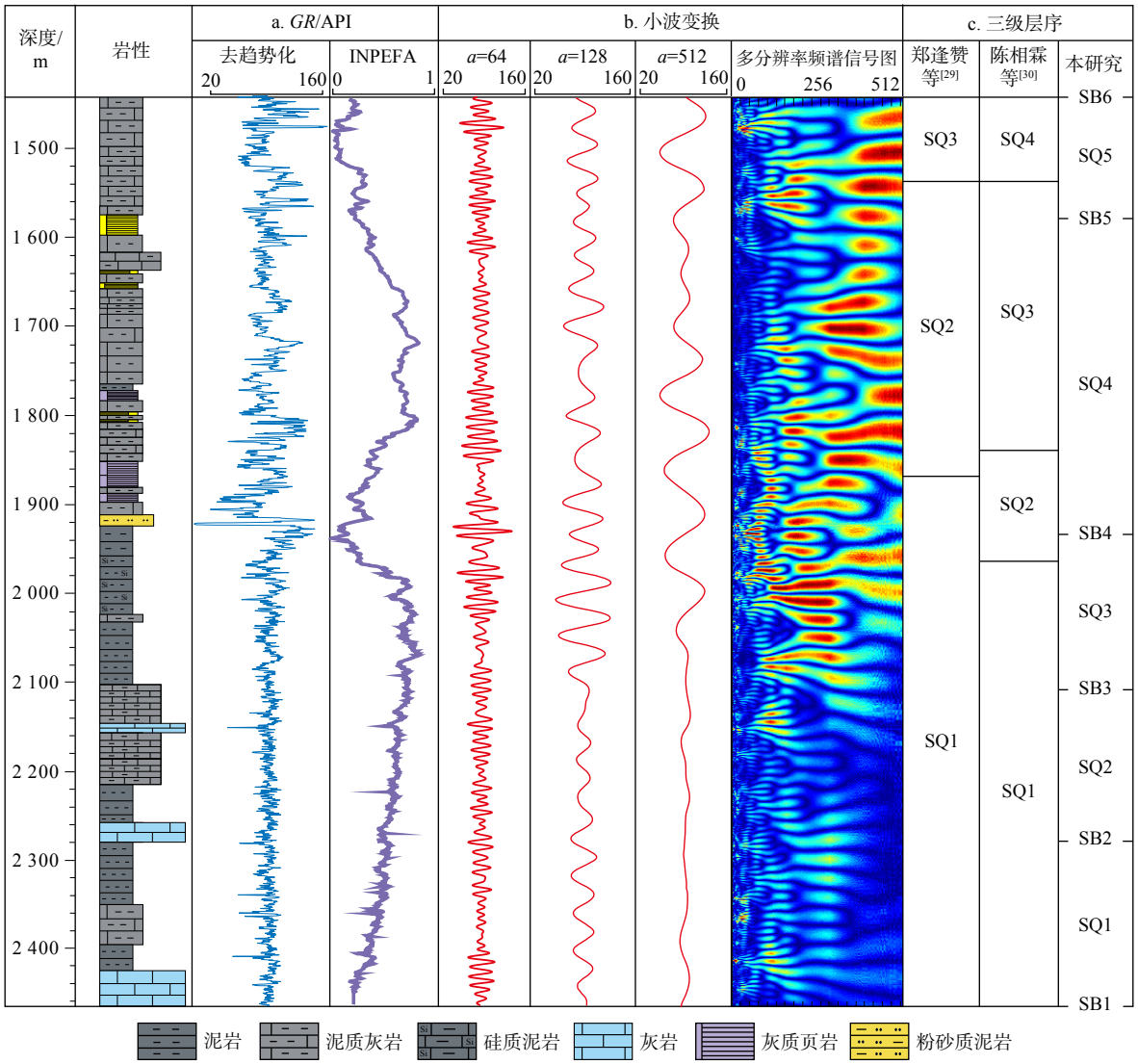
LI 等[66] 提出的沉积噪音模型（DYNOT 和 ρ1）是基于调谐后的动态模型，已被证实是一种恢复海平面变化的高可信度方法[67-68]。DYNOT 模型旨在测量气候和海平面替代指标中的噪声。如果与替代指标相关的噪声以及其他客观因素影响较小，则噪声的方差可以作为相对海平面变化的指标。具体而言，当海平面相对较高时，DYNOT 信号更弱；海平面相对较低时，则 DYNOT 信号更强。相比之下，ρ1 模型是方差在功率谱上分布的简单度量。ρ1 最有效的应用是红噪声谱的一阶自回归建模。当 ρ1 值较低时，方差在功率谱上的分布更为均匀；对于较高的 ρ1 值，方差优先发生在低频。也就是说，ρ1 测量方差的“红度”作为频率的函数：较少的红色（较低的 ρ1 值）表示更多的不相关噪声；ρ1 值越高，光谱越红，动态噪声越低，即噪声的增加会导致 ρ1 值的降低，反之则升高。因此，DYNOT 和 ρ1 模型向相反方向移动以标记不相关噪声的存在并非偶然[69-70]。

基于时间序列分析结果，对黔水地 1 井调谐后的 GR 序列进行沉积噪音模型分析（DYNOT 和 ρ1）。蒙特卡洛模拟的滑动窗口参数设置为 300 ~ 500 ka，滑动步长设置为 5 ka，蒙特卡洛模拟计算次数设置为 5 000 次。

3　结果

3.1　INPEFA 及小波变化的层序地层分析

基于 INPEFA 曲线及小波变化分析结果（图 3a，b）对黔西南地区打屋坝组地层进行初步层序划分，共识别 6 个三级层序界面（SB1 ~ SB6），划分 5 个三级层序（SQ1 ~ SQ5）（图 3c）。在这些层序界面中，SB4 和 SB5 与 INPEFA 曲线的正向拐点重合，这些转折点通常与 *GR* 值较低的区域相对应。SB3 呈现出一个过渡面的特征，标志着地层上下小波能量的逐渐减弱，表明沉积环境在这一边界发生了变化，可能源于沉积条件的变化或海平面的波动。SB4 处 *GR* 值从高到低发生突变，与 INPEFA 曲线的正向拐点同步。而在 SB1、SB2 和 SB3 之间，低分辨率小波系数曲线（a=512）显示出低振幅振荡（低能量）的特点。



a. 黔水地 1 井 *GR* 去趋势化和 INPEFA 曲线; b. 尺度因子 *a*=64, 128, 512 3 种分辨率的小波能谱图; c. 打屋坝组层序地层划分方案; SB1 ~ SB6. 三级层序界面; SQ1 ~ SQ5. 三级层序

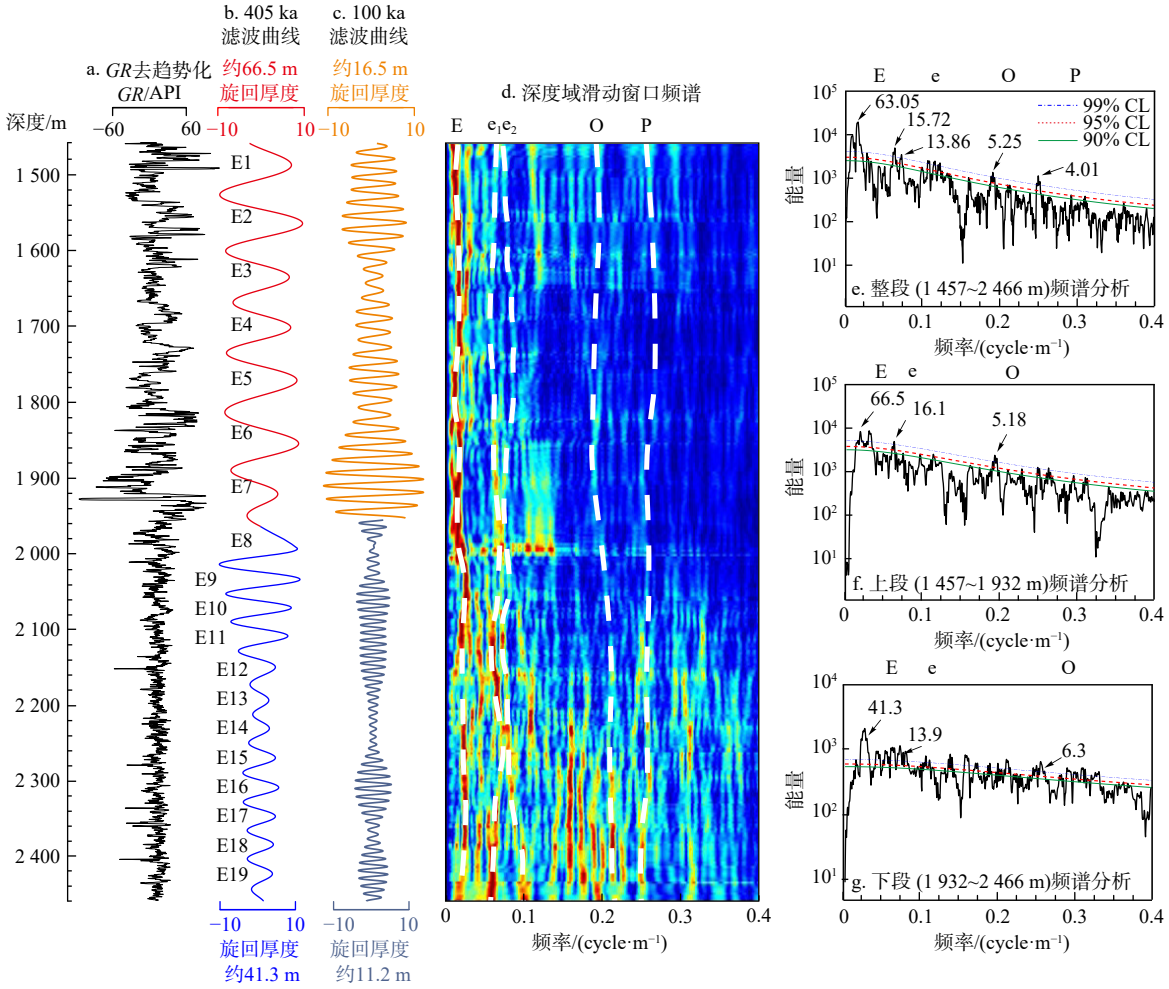
图 3　INPEFA、小波变换及三级层序划分

Fig. 3　INPEFA, wavelet transform and three-level sequence division

3.2　时间序列分析

MTM 分析结果显示地层中有 9 个显著频率谱，分别为 114.68, 63.05, 15.72, 13.86, 9.23, 8.66, 8.19, 5.25, 4.01 m, 均具有超过 99% 的置信水平，选取其中与 WALTHAM[71] 计算的天文周期(405, 125, 95, 37.9, 31.5, 22.6 ka)的比值相接近的数据，从而初步推断该套页岩地层沉积中保存了天文轨道周期信号。经分析受控于长偏心率(405 ka)周期影响的沉积厚度为 63.05 m, 短偏心率周期(95 ka)匹配的沉积厚度为 15.72, 13.86 m, 受控于斜率周期(32 ka)和岁差周期(24 ka)的沉积厚度分别为 5.25, 4.01 m, 且整段滑动频谱窗口上显示明显的能量信号。值得注意的是，滑动频谱信号在 1932 m 处左右有明显的变化(图 4d)，认为沉积速率在该界面上下出现了较大变化，因此本研究以 1932 m 为界限，分上段(1457 ~ 1932 m)和下段(1932 ~ 2466 m)分别进行频谱分析(图 4d)。通过比值法计算得到的平均沉积速率为 15.6 cm/ka。

运用相关系数法(COCO)对初步识别的天文周期进行检验后：确定打屋坝组最优沉积速率为 16.4 cm/ka(图 5a)，H_0(零假设)显著水平低于 0.001(图 5d)，表明 16.4 cm/ka 为整段地层的最优沉积速率。值得注意的是，该沉积速率在海相页岩地层中偏高，推测打屋坝组页岩沉积时期主要受控于垭紫罗裂陷槽活动，受断层下陷事件影响，沉积可容纳空间变大，沉积物运移的速度加快，导致沉积速率的上升，整体具有高沉积速率特征[57]。通过相关系数法(COCO)得出的最优沉积速率，计算得出黔水地 1 井



b. 上段(1 457 ~ 1 932 m)405 ka 和下段(1 932 ~ 2 466 m)405 ka 滤波曲线; 图 e ~ g 中数字为地层中存在的米兰科维奇周期厚度(m); e ~ g 图中 E, e, O, P 均为米兰科维奇周期代号; d 图中 E. 长偏心率; e1, e2. 短偏心率; O. 斜率; P. 岁差; CL. 置信水平; 下同

图 4　频谱分析及滤波

Fig. 4　Spectral analysis and filtering

打屋坝组受控于长偏心率的旋回地层厚度约为 66.42 m, 与频谱分析所得出 63.05 m 的周期近似。以 1 932 m 为界限, 对上下 2 段(上段: 1 457 ~ 1 932 m, 下段: 1 932 ~ 2 466 m)重复 COCO 与 eCOCO 分析(图 5e ~ h), 获得上段的最优沉积速率为 16.5 cm/ka, 下段最优沉积速率为 11.2 cm/ka, 估算出上段受控于长偏心率 405 ka 的旋回厚度为 66.82 m, 下段为 45.36 m, 与频谱分析结果基本一致。滤波结果显示上段记录了 7 个完整的长偏心率旋回, 下段记录了 12 个完整的长偏心率旋回, 合成后整条滤波曲线共计 19 个长偏心率旋回(图 4b)。

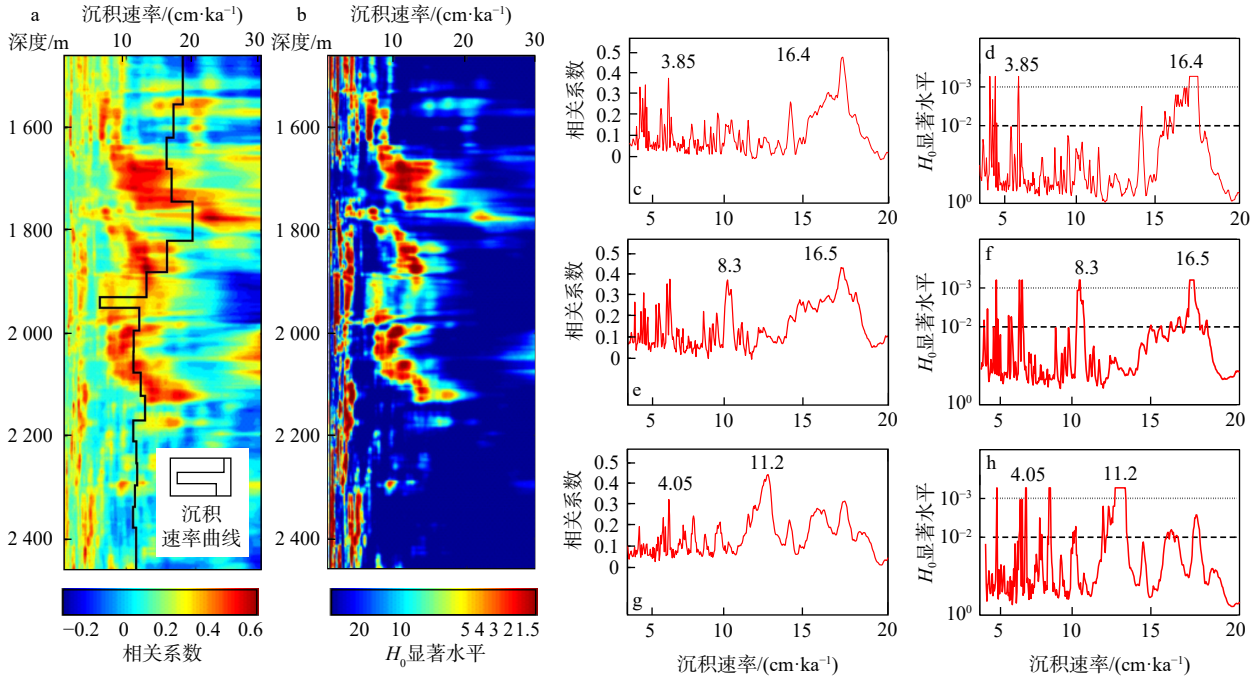
3.3　天文调谐

天文调谐结果显示, 本研究的地层沉积时限分别为上段 2.88 Ma, 下段 4.98 Ma, 打屋坝组持续时限约为 7.86 Ma。为验证所解释的结果, 对调谐后的时间域 GR 数据再次进行频谱分析, 结果显示 405 ka(E), 95 ka(e)、32 ka(O)处具有明显的信号, 尤其是 405 ka 的长偏心率周期在滑动频谱上表现出连续且显著的特点(图 6f)。

黔西南地区打屋坝组底部与旧司组顶底界面相互对应[72]。沈阳等[41] 根据有孔虫化石带约束了旧司组(打屋坝组)的具体位置, 证实其位于维宪阶的中部, 并且确定旧司组(打屋坝组)底界面与维宪阶底界面(346.7 Ma)相互对应。根据调谐结果计算出打屋坝组顶界面年代约为 338.8 Ma, 在维宪阶时期处于中部–中下部, 认为该结果与黔西南的区域年代地质学并不矛盾[73-74]。

3.4　超长周期斜率调幅分析

对黔水地 1 井调谐后长偏心率(405 ka)的时间域序列进行了调幅分析, 以提取可能存在的约 1.2 Ma 周期信号。对黔水地 1 井 GR 曲线时间域序列进行约 32 ka 的高斯带通滤波, 滤波带宽为(0.023±



a ~ d. 黔水地 1 井整段(1 457 ~ 2 466 m)使用窗口 150 m 的 eCOCO 分析和 COCO 分析; e, f. 上段(1 457 ~ 1 932 m)COCO 分析; g, h. 下段(1 932 ~ 2 466 m)COCO 分析。图 d, f, h 中虚线代表不同的最优沉积速率的显著水平, 超过 10^{-3} 代表可信度最高; 图 c ~ h 中数字代表确定的最可能的最优沉积速率

图 5　COCO 及 eCOCO 分析

Fig. 5　COCO and eCOCO analysis

0.001 5)ka^{-1}, 得到 GR 时间序列的斜率周期曲线, 经过斜率调幅得到斜率滤波的包络线, 对包络线进行频谱分析, 从而确定存在 1.2 Ma 的周期(图 7a)。最后将包络线中存在的约 1.2 Ma 超长斜率周期经高斯带通滤波提取出来, 带通滤波中值为(0.000 83±0.000 03)ka^{-1}。结果显示黔水地 1 井含有 6.5 个约 1.2 Ma 超长斜率周期(图 6i)。

3.5　沉积噪音模型及层序地层划分

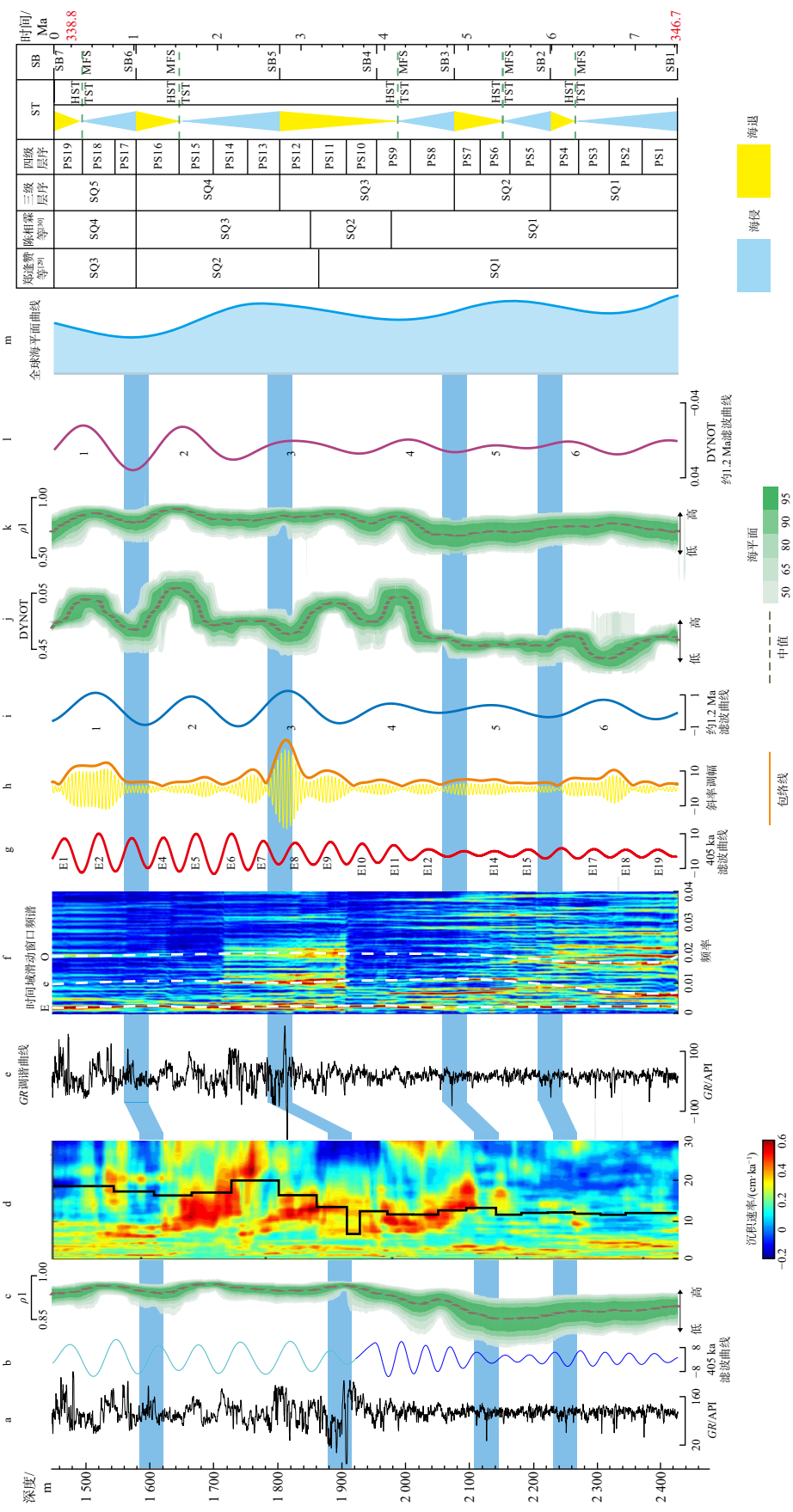
沉积噪音模型结果显示, 在研究层段内显著增强的噪声层段均出现在 eCOCO 图谱中相关系数的蓝色条带区域(图 6d, j), 这反映了在相对浅水和不稳定的沉积环境中噪声的增加情况, 同时也说明了相对海平面处于下降阶段。此外, DYNOT 和 ρ1 表现出几乎相同的曲线形态(图 6j, k)。eCOCO、ρ1 和 DYNOT 模型值具有良好的一致性, 进一步表明海退过程中沉积环境的不稳定性增加可能与信噪比的降低有关。DYNOT 中值频谱结果显示, 黔水地 1 井沉积噪声周期为 1.5 ~ 1.2 Ma(图 7b)。对 DYNOT 中值曲线的约 1.2 Ma 周期以(0.000 8±0.000 2)个 cycle/ka 的带宽进行滤波。滤波结果显示, 黔水地 1 井打屋坝组存在 6.5 个约 1.2 Ma 的长周期(图 6l)。

基于沉积噪音模型恢复的相对海平面变化曲线, 尝试对黔水地 1 井打屋坝组地层进行层序划分。将约 1.2 Ma 超长斜率周期曲线与 DYNOT 中值的滤波曲线进行对比, 发现它们的相位变化基本保持一致, 且每 1 ~ 2 个约 1.2 Ma 超长斜率周期曲线的最小值与 DYNOT 高值(低水面)相对应。以沉积噪音模型和 1.2 Ma 滤波曲线为指导, 识别了 6 个三级层序界面, 划分了 5 个三级层序(图 6)。每个三级层序都包含 1 ~ 2 个约 1.2 Ma 的超长斜率周期, 与三级层序沉积时限(0.5 ~ 3 Ma)一致[15]。

4　讨　论

4.1　早石炭世基于沉积噪声模型的海平面变化解释

沉积岩中不同气候替代指标保存的信息包括“信号”(即轨道周期作用下的产物)和“噪声”, 以及无轨道控制作用的影响因素, 如生物扰动、不稳定沉降和定年误差等, 在固定位置与水深有关的噪声的变化可能与海平面的变化相关联, 较高的海平面使得沉积过程处于一个较安静的深水环境, 相应地沉积“噪音”相比于低海平面时会降低。相对海平面变化影响了信噪比, 信噪比的增加可能与沉积环境稳定性的提高有关, 而沉积环境稳定性又与海平面的升高有关; 沉积噪声模型的结果也证实了这一点。



黔水地 1 井、三级层序划分、DYNOT 和 ρ1 模型周期和斜率调幅周期的相关性；a. 黔水地 1 井的 *GR*；b. 黔水地 1 井深度域的 405 ka 滤波曲线(带宽范围为 0.0189 ~ 0.018 cycles/m)；c. 基于黔水地 1 井去趋势深度域 *GR* 的 ρ1 模型海平面曲线模拟；d. 整段(1 457 ~ 2 466 m)的沉积速率曲线；e. 黔水地 1 井的 405 ka 校准 GR 时间序列；f. 时间域的滑动窗口频谱分析；g. 黔水地 1 井的调谐 GR 时间序列的 405 ka 滤波曲线，E1 ~ E19 为识别到的 405 ka 偏心率个数；h. 黔水地 1 井 405 ka 调谐 GR 时间序列中斜率信号的调幅(AM)；黄线是 36 ka 的斜率滤波器，带宽为 0.0215 ~ 0.0245 cycles/ka；i. 黔水地 1 井轨道斜率 1.2 Ma 调幅滤波曲线，带宽范围为 0.0006 ~ 0.001 cycles/m。图中 1 ~ 6 为识别到的 1.2 Ma 的超长斜率个数；j. 基于黔水地 1 井 405 ka 调谐 GR 时间序列的 DYNOT 模型海平面曲线模拟，图中 1 ~ 6 为在 DYNOT 中值曲线中识别到的 1.2 Ma 的周期个数；k. 基于黔水地 1 井 405 ka 调谐 GR 时间序列的 ρ1 模型海平面曲线模拟；l. 黔水地 1 井 DYNOT 中值曲线的 1.2 Ma 滤波曲线，带宽范围为 0.0006 ~ 0.001 cycles/ka；m. 338.8 ~ 346.7 Ma 全球海平面变化曲线

图 6　黔水地 1 井打屋坝组三级层序划分

Fig. 6　Three levels of sequence division of Well QianShuiDi 1 Dawuba Formation

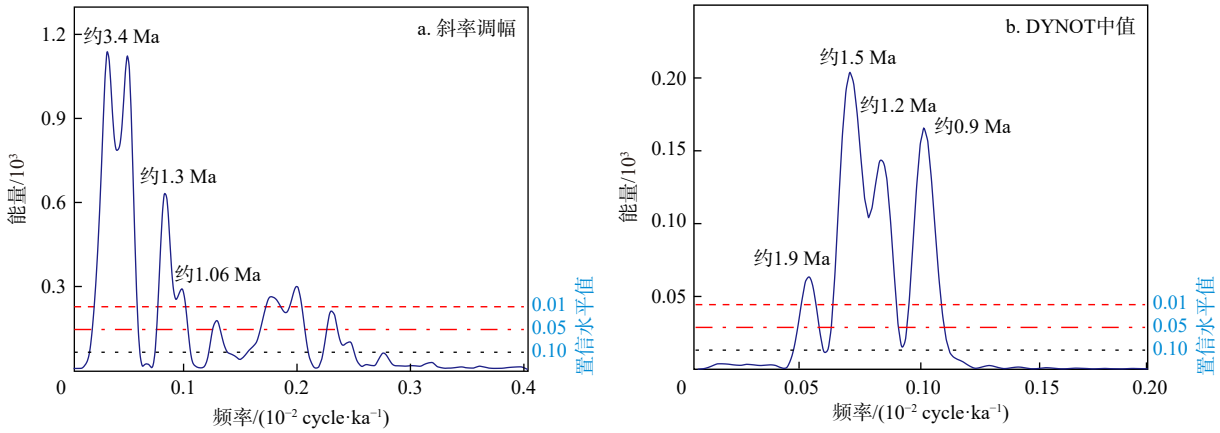


图 7　斜率包络线 (a) 及 DYNOT 中值 (b) 频谱分析

Fig. 7　Simple periodograms of the AM envelopes (a) and the DYNOT median (b)

用于重建海平面的 3 种“噪声”主要依赖于检测与海平面相关的噪声，如浊流、风暴或波浪，而生物扰动和不稳定沉积速率在海洋沉积物中的作用相对较弱[75]。其余 2 类噪声包括与 GR 相关的噪声(定年不确定性)和其他因素，如构造和火山作用。对于定年不确定性噪声，本研究将 ρ1 模型应用于调谐后和原始的 GR 数据，得到了一致的结果(图 6c, j)，表明打屋坝组页岩地层与定年不确定性相关的相对噪声对沉积噪声的估计影响较小。此外，以往的地质背景研究没有在黔西南地区发现存在突发性的构造活动(地震引起的滑塌运动可以改变海平面)和火山活动(生物扰动作用的增强导致水循环发生变化)的证据[76]。

4.2　长周期对层序发育的控制

关于三级层序和海平面变化的驱动机制长期以来备受关注，诸多地质证据证实了天文轨道周期通过调制气候的变化来控制海平面变化[77]。冰期的超长斜率周期(1.2 Ma)控制着三级层序海平面升降。目前普遍认为高频层序的形成与地球接收到的太阳辐射量的周期性变化密切相关，这种变化引起了冰川的消长，进而导致全球海平面的变化[78]。旋回地层学相比经典层序地层学理论在受海平面变化控制的成因和机理上颇为相似，而天文旋回的时间内涵所标定的地质年代，可以作为划分三级乃至更高频层序的地质依据。

本研究根据沉积噪音模型计算得出的 DYNOT 和 $\rho 1$ 中值曲线，揭示了打屋坝组的相对海平面变化特征，结合 INPEFA 曲线和小波分析识别了 6 个层序界面，划分了 5 个三级层序(图 6)。其中层序界面的识别与 DYNOT 中值曲线的高值区和 ρ1 模型中值曲线的低值区相对应，表明相对海平面下降到最低点，即为层序界面。而位于海侵旋回和海退旋回之间的 5 个最大海泛面，则对应于 DYNOT 中值曲线的低值区及 ρ1 模型中值曲线的高值区，表明相对海平面上升到最高点，即为最大海泛面。与前人层序地层划分结果的对比显示，DYNOT 噪音高值对应的 1 457, 1 580 m 与郑逢赞等[29] 和陈相霖[30] 等所识别的部分层序界面深度基本一致。根据 VAIL 等[15] 提出的单个三级层序的时限应在 0.5 ~ 3 Ma 的时间范围内，认为层序划分结果可信度较高。此外，本研究基于旋回地层学的沉积噪音模型在一定程度上可以与已知的全球海平面曲线进行比较(图 6m)。

天文轨道周期引起的气候变化导致了温度、海平面、河流输入沉积物的强度等发生变化[79-80]。其中，相对海平面降低导致碎屑物输入增强，砂泥比的增高导致 *GR* 值降低，本研究参考前人[81-83] 对四级层序控制因素的总结，认为四级层序是具有高幅水深变化、彼此有成因联系的次级海进–海退序列，与中期基准面旋回对应，受长偏心率周期所控制，持续时间约 405 ka。405 ka 滤波曲线的波峰对应四级层序的最大海泛面，波谷则对应四级层序界面(图 6g)。此外，BOULILA 等[25] 研究表明，斜率周期控制下的冰盖增长和消融影响着海平面升降，对 GR 时间域数据的斜率滤波曲线进行包络线调幅分析显示，斜率有约 1.2 Ma 的调制周期。而 1.2 Ma 周期同时也是海平面变化的重要影响因素：在斜率最小值且处于约 1.2 Ma 长周期节点处，太阳辐射的变化最小，对冰川的生长起到了促进作用，同期对应着海平面的降低。这一结论已在新生代冰川型海平面变化中得到证实，且前人[84-85] 曾在古生代末次大冰期中也发现了约 1.2 Ma 周期控制下的海平面升降旋回。本研究根据斜率周期调幅信号计算出的约 1.2 Ma 长

周期, 与区域三级海平面变化具有良好的对应关系(图 6i ~ k)。

石炭纪在全球范围内发育不同级次的海侵–海退旋回, 尤其是在低纬度地区。前人[86-87]经过多次研究证实 405 ka 的长偏心率周期及约 1.2 Ma 的超长斜率周期控制着泛欧美大陆低纬度地区的气候变化。对于华南板块黔西南地区而言, 早石炭世的气候变化明显受到天文轨道作用的影响。此外, 在本研究的基础上, 可进一步尝试将保存了天文轨道周期信号的打屋坝组页岩与欧美大陆上高精度地质年代学约束的记录进行对比, 并在等时性的前提下对比不同板块海平面变化记录, 探究早石炭世维宪期冰川型海平面变化的驱动力。

5 结 论

(1)黔水地 1 井打屋坝组记录的在天文轨道控制作用下的沉积周期分别为 405, 95, 32, 24 ka, 根据长偏心率周期的天文校准建立了“浮动”天文年代标尺。基于调谐后的时间域序列, 建立研究层段的沉积噪音模型(DYNOT 和 ρ1), 恢复海平面变化曲线。根据相对海平面变化曲线的极值, 结合 INPEFA 分析和小波分析对黔水地 1 井打屋坝组进行最大海泛面的识别和三级层序的划分。黔水地 1 井打屋坝组识别了 6 个三级层序界面, 划分出 5 个三级层序, 且层序界面对应于 INPEFA 曲线的正向拐点和 DYNOT 高值区(低海平面), 与前人[29-30]层序边界的识别部分一致。

(2)基于沉积噪音模型的海平面变化进行解释, 认为相对海平面变化影响了信噪比, 建立了信噪比、沉积环境稳定性和海平面变化三者的关系。层序界面均识别于 DYNOT 中值曲线的高值区, 及对应 $\rho 1$ 中值曲线的低值区, 代表相对海平面下降到最低点, 沉积速率相对最大; 位于海侵旋回和海退旋回之间的 5 个最大海泛面与 DYNOT 中值曲线的低值区及 $\rho 1$ 中值曲线的高值区相对应, 表明相对海平面上升到最高点, 沉积速率相对最小。

(3)DYNOT 中值曲线的频谱分析结果指示了沉积噪音中存在约 1.2 Ma 的长斜率周期信号, 与斜率调幅分析结果一致, 且斜率包络线约 1.2 Ma 的滤波曲线与 DYNOT 中值曲线滤波后的约 1.2 Ma 周期曲线呈同相位关系。同时每个三级层序包含 1 ~ 2 个约 1.2 Ma 的超长斜率周期, 与层序地层学三级层序沉积时限(0.5 ~ 3 Ma)一致, 表面打屋坝组三级海平面变化可能是受约 1.2 Ma 超长斜率所调制。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献:

[1] QIE W K, ALGEO T J, LUO G M, et al. Global events of the Late Paleozoic (Early Devonian to Middle Permian): A review[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2019, 531: 109259.

[2] WU Y W, TIAN H, LI T F, et al. Enhanced terrestrial organic matter burial in the marine shales of Yangtze Platform during the Early Carboniferous interglacial interval[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 129: 105064.

[3] YAO L, QIE W K, LUO G M, et al. The TICE event: Perturbation of carbon-nitrogen cycles during the mid-Tournaisian (Early Carboniferous) greenhouse-icehouse transition[J]. Chemical Geology, 2015, 401: 1-14.

[4] CROWELL J C. Pre-Mesozoic Ice ages: Their bearing on understanding the climate system[J]. Geology Society of America member, 1999, 192: 106.

[5] BRUCKSCHEN P, BRUHN F, VEIZER J, et al. $^{87}Sr/^{86}Sr$ isotopic evolution of Lower Carboniferous seawater: Dinantian of western Europe[J]. Sedimentary Geology, 1995, 100(1-4): 63-81.

[6] 杨博伟, 石万忠, 张晓明, 等. 黔南地区下石炭统打屋坝组页岩气储层孔隙结构特征及含气性评价 [J]. 岩性油气藏, 2024, 36(1): 45-58.
YANG B W, SHI W Z, ZHANG X M, et al. Pore structure characteristics and gas-bearing properties of shale gas reservoirs of Lower Carboniferous Dawuba Formation in southern Guizhou[J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(1): 45-58. (in Chinese with English abstract)

[7] 卢树藩. 贵州石炭系打屋坝组页岩气成藏规律及勘探选区研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
LU S F. Study on shale gas accumulation law and exploration selection area of Carboniferous Dawuba Formation in Guizhou[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019. (in Chinese with English abstract)

[8] 石巨业, 金之钧, 刘全有, 等. 基于米兰科维奇理论的湖相细粒沉积岩高频层序定量划分 [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6): 1205-1214.
SHI J Y, JIN Z J, LIU Q Y, et al. Quantitative classification of high-frequency sequences in fine-grained lacustrine sedimentary rocks based on Milankovitch theory[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1205-1214. (in Chinese with English abstract)

[9] YAO X, HINNOV L A. Advances in characterizing the cyclostratigraphy of binary chert-mudstone lithologic successions, Permian (Roadian-lower Capitanian), Chaohu, Lower Yangtze, South China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2019, 528: 258-271.

[10] ZHONG Y Y, WU H C, FAN J X, et al. Late Ordovician obliquity-forced glacio-eustasy recorded in the Yangtze Block, South China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2020, 540: 109520.

[11] 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.

[12] LIU S B, JIN S D, LIU Y, et al. Astronomical forced sequence infill of Early Cambrian Qiongzhusi organic-rich shale of Sichuan Basin, South China[J]. Sedimentary Geology, 2022, 440: 106261.

[13] LU Y B, HUANG C J, JIANG S, 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.

[14] WU H C, FANG Q, HINNOV L A, et al. Astronomical time scale for the Paleozoic Era[J]. Earth-Science Reviews, 2023, 244: 104510.

[15] VAIL P R, MITCHUM R M, THOMPSON S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 3. Relative changes of sea level from coastal onlap[J]. Antimicrob Agents Chemother, 1977, 41(9): 1859-1866.

[16] CATUNEANU O, ABREU V, BHATTACHARYA J P, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy[J]. Earth-Science Reviews, 2009, 92(1/2): 1-33.

[17] JIN S D, CAO H Y, WANG H, et al. Orbital cyclicity in sedimentary sequence and climatic indications of C-O isotopes from Lower Cretaceous in Qingxi Sag, Jiuquan Basin, NW China[J]. Geoscience Frontiers, 2019, 10(2): 467-479.

[18] ZECCHIN M. The architectural variability of small-scale cycles in shelf and ramp clastic systems: The controlling factors[J]. Earth-Science Reviews, 2007, 84(1/2): 21-55.

[19] VAIL P R. The stratigraphic signatures of tectonics, eustacy and sedimentology-an overview: Cycles and events in stratigraphy[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1991, 617-659.

[20] SLATT R M, RODRIGUEZ N D. Comparative sequence stratigraphy and organic geochemistry of gas shales: Commonality or coincidence[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2012, 8: 68-84.

[21] 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.

[22] BUONOCUNTO F P, BRUNO D, FERRERI V, et al. Orbital cyclostratigraphy and sequence stratigraphy of Upper Cretaceous Platform carbonates at Monte Sant'Erasmo, southern Apennines, Italy[J]. Cretaceous Research, 1999, 20(1): 81-95.

[23] STRASSER A H, HECKEL P H. Cyclostratigraphy concepts, definitions, and applications[J]. Newsletters on Stratigraphy, 2007, 42(2): 75-114.

[24] SCHWARZACHER W. Cyclostratigraphy and the Milankovitch theory: Developments in sedimentology[J]. Sedimentary Geology, 1993, 52: 1-225.

[25] 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.

[26] GONG Z, LI M S. Astrochronology of the Ediacaran Shuram carbon isotope excursion, Oman[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 547: 116462.

[27] 刘洋. 东海盆地西湖凹陷沉积记录的天文旋回响应 [J]. 地质科技通报, 2020, 39(3): 120-128.
LIU Y. Response to astronomical forcing of sedimentary record in Xihu Depression, East China Sea Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(3): 120-128. (in Chinese with English abstract)

[28] 卢树藩, 何犇, 杜胜江. 黔南代页 1 井下石炭统打屋坝组页岩气地质条件及勘探前景 [J]. 中国地质调查, 2016, 3(4): 6-11.
LU S F, HE B, DU S J. Geological conditions and exploration prospect of shale gas in Dawuba Formation of Lower Carboniferous of Daiye-1 Well in southern Guizhou Province[J]. Geological Survey of China, 2016, 3(4): 6-11. (in Chinese with English abstract.

[29] 郑逢赞, 苑坤, 单俊峰, 等. 复杂构造区页岩含气性与保存条件评价：以黔西南垭紫罗断裂带打屋坝组为例 [J]. 中国海上油气, 2022, 34(4): 109-121.
ZHENG F Z, YUAN K, SHAN J F, et al. Evaluation of shale gas content and preservation conditions in complex structural areas: A case study of Dawuba Formation of the Yaziluo fault zone in southwest Guizhou Province[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(4): 109-121. (in Chinese with English abstract)

[30] 陈相霖, 苑坤, 林拓, 等. 四川垭紫罗裂陷槽西北缘(黔水地 1 井)发现上古生界海相页岩气 [J]. 中国地质, 2021, 48(2): 661-662.
CHEN X L, YUAN K, LIN T, et al. Discovery of shale gas within Upper Paleozoic marine facies by Qian Shuidi-1 Well in the northwest of Yaziluo rift trough, Sichuan Province[J]. Geology in China, 2021, 48(2): 661-662. (in Chinese with English abstract)

[31] BAYET-GOLL A, SHARAFI M, HASANLOU M, et al. Reconstruction of Tournaisian-Viséan tectonic and climatically induced event histories of the Mobarak carbonate platform along depositional strike in the northeastern margin of Gondwana: Constraints from high-resolution cycle and sequence stratigraphy[J]. Marine and Petroleum Geology, 2023, 155: 106356.

[32] YUAN K, HUANG W H, FANG X X, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of the Middle Devonian organic-rich shales in the Northwest of Guizhong Depression, Southwest China[J]. China Geology, 2020, 3(4): 567-574.

[33] LAKIN J A, MARSHALL J E A, TROTH I, et al. Greenhouse to icehouse: A biostratigraphic review of latest Devonian-Mississippian glaciations and their global effects[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2016, 423(1): 439-464.

[34] KAISER S I, BECKER R T, STEUBER T, et al. Climate-controlled mass extinctions, facies, and sea-level changes around the Devonian-Carboniferous boundary in the eastern Anti-Atlas (SE Morocco)[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2011, 310(3/4): 340-364.

[35] 吴祥和. 黔南泥盆–石炭系界线层层序和海退事件 [J]. 地层学杂志, 1986, 10(3): 204-211.
WU X H. The sequence of Devonian-Carboniferous boundary beds and the regressive event of South Guizhou[J]. Journal of Stratigraphy, 1986, 10(3): 204-211. (in Chinese with English abstract)

[36] 苏慧敏, 杨瑞东, 程伟, 等. 贵州西南部下石炭统打屋坝组页岩气成藏特征与有利区分析 [J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2017,

34(3): 41-46.
SU H M, YANG R D, CHENG W, et al. Shale gas accumulation characteristics and advantageous area analysis of Lower Carboniferous Dawuba Formation in southwestern Guizhou[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2017, 34(3): 41-46. (in Chinese with English abstract)

[37] 何犇. 贵州紫云地区下石炭统打屋坝组沉积环境研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
HE B. Study on sedimentary environment of Dawuba Formation of Lower Carboniferous in Ziyun area of Guizhou Province[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019. (in Chinese with English abstract)

[38] 侯鸿飞, 高联达, 季强. 国际泥盆–石炭系界线研究介绍 [J]. 地质论评, 1985, 31(1): 87-93.
HOU H F, GAO L D, JI Q. Introduction of international Devonian-Carboniferous boundary research[J]. Geological Review, 1985, 31(1): 87-93. (in Chinese with English abstract)

[39] 季强, 魏家庸, 王洪第, 等. 贵州长顺睦化泥盆–石炭系界线层型研究的新进展: 介绍大坡上泥盆–石炭系界线剖面 [J]. 地质学报, 1988, 62(2): 97-110.
JI Q, WEI J Y, WANG H D, et al. New advances in the study on the Devonian-Carboniferous boundary stratotype in Muhua, Changshun, Guizhou: An introduction to the Dapoushang Devonian-Carboniferous boundary section[J]. Acta Geological Sinica, 1988, 62(2): 97-110. (in Chinese with English abstract)

[40] 季强, 魏家庸, 王洪第, 等. 贵州长顺睦化泥盆–石炭系界线研究取得重大突破: 介绍大坡上泥盆–石炭系界线剖面 [J]. 中国地质, 1988, 15(3): 28-30.
JI Q, WEI J Y, WANG H D, et al. A great breakthrough has been made in the study of the Devonian-Carboniferous boundary in Muhua, Changshun, Guizhou: Introduction to the Devonian-Carboniferous boundary section on Dapo[J]. Chinese Geology, 1988, 15(3): 28-30. (in Chinese)

[41] 沈阳, 王训练, 李玉坤, 等. 黔南上司地区石炭系有孔虫: 兼论华南维宪阶有孔虫生物地层序列 [J]. 地学前缘, 2020, 27(6): 213-233.
SHEN Y, WANG X L, LI Y K, et al. Carboniferous foraminifers from the Shangsi area in southern Guizhou and the Visean foraminiferal succession in South China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(6): 213-233. (in Chinese with English abstract)

[42] 冯伟明, 李嵘, 赵瞻, 等. 贵州威宁地区贵威地 1 井钻获石炭系页岩气和致密砂岩气 [J]. 中国地质, 2019, 46(5): 1241-1242.
FENG W M, LI R, ZHAO Z, et al. The discovery of tight gas and shale gas in Carboniferous strata in Guiweidi 1 Well, Weining County, Guizhou Province[J]. Geology in China, 2019, 46(5): 1241-1242. (in Chinese with English abstract)

[43] 冯伟明, 林家善, 李嵘, 等. 上扬子垭紫罗裂陷槽北西段 GWD2 井下石炭统旧司组暗色页岩发育特征及其对生烃中心的约束 [J]. 中国地质, 2024, 51(6): 2002-2016.
FENG W M, LIN J S, LI R, et al. Development characteristics of Lower Carboniferous Jiusi Formation dark shale in Well GWD-2 and it's constraint to hydrocarbon generation center in the Northwest of Yadu Ziyun-Luodian aulacogen, the Upper Yangtze Platform[J]. Geology in China, 2024, 51(6): 2002-2016. (in Chinese with English abstract)

[44] 李治, 冉彬, 王明晗, 等. 贵州紫云地区石炭系打屋坝组沉积相分析 [J]. 河北地质大学学报, 2017, 40(2): 1-9.
LI Z, RAN B, WANG M H, et al. Sedimentary facies analysis of Carboniferous Dawuba Group in Ziyun district of Guizhou Province[J]. Journal of Hebei GEO University, 2017, 40(2): 1-9. (in Chinese with English abstract)

[45] 吴欣松, 郭娟娟, 黄永建, 等. 松辽盆地晚白垩世古气候变化的测井替代指标 [J]. 古地理学报, 2011, 13(1): 103-110.
WU X S, GUO J J, HUANG Y J, et al. Well logging proxy of the Late Cretaceous palaeoclimate change in Songliao Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(1): 103-110. (in Chinese with English abstract)

[46] 陈书平, 王毅, 周子勇, 等. 塔里木盆地中–下寒武统自然伽马测井曲线周期及其在沉积层序划分中的意义 [J]. 地质通报, 2020, 39(7): 943-949.
CHEN S P, WANG Y, ZHOU Z Y, et al. The cycles filtered from natural gamma-ray logging curves of Lower-Middle Cambrian in the Tarim Basin and their significance in sedimentary sequence division[J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(7): 943-949. (in Chinese with English abstract)

[47] 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.

[48] 李培廉, 盛蔚. 米氏旋回在平湖油气田高分辨率层序地层分析中的应用 [J]. 中国海上油气(地质), 1994(3): 171-177.
LI P L, SHENG W. Application of milankovitch cycle hypothesis in the high-resolution sequence stratigraphy study of Pinghu oil field[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1994(3): 171-177. (in Chinese with English abstract)

[49] 李庆谋. 测井曲线 Milankovitch 周期分析与应用 [J]. 地球物理学报, 1996, 39(5): 699-704.
LI Q M. The analysis and application of Milankovitch cycles by logging data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1996, 39(5): 699-704. (in Chinese)

[50] 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 H C, ZHANG S H, HUANG Q H. 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. (in Chinese with English abstract)

[51] 薛欢欢, 李景哲, 李恕军, 等. INPEFA 在高分辨率层序地层研究中的应用: 以鄂尔多斯盆地油房庄地区长 4+5 油组为例 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(7): 101-106.
XUE H H, LI J Z, LI S J, et al. Application of INPEFA technique to research high resolution sequence stratigraphy: As an example of Youfangzhuang area Chang 4+5 in Ordos Basin[J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(7): 101-106. (in Chinese with English abstract)

[52] 周亚伟, 杜玉洪, 谢俊, 等. INPEFA 技术与小波变换在层序地层划分中的应用与对比: 以饶阳凹陷大王庄地区东营组三段为

例 [J]. 中国科技论文, 2021, 16(5): 494-501.
ZHOU Y W, DU Y H, XIE J, et al. Application and comparison of INPEFA technique and wavelet transform in sequence stratigraphic division: A case study in the Third Member of Dongying Formation in Dawangzhuang area, Raoyang Sag[J]. China Sciencepaper, 2021, 16(5): 494-501. (in Chinese with English abstract)

[53] DEJONG M, NIO S D, SMITH D, et al. Subsurface correlation in the Upper Carboniferous (Westphalian) of the Anglo-Dutch Basin using the climate stratigraphic approach[J]. First Break, 2007, 25(12): 49-59.

[54] DJINNIO S, BROUWER J H, SMITH D, et al. Spectral trend attribute analysis: Applications in the stratigraphic analysis of wireline logs[J]. First Break, 2005, 23(4): 71-75.

[55] 路顺行, 张红贞, 孟恩, 等. 运用 INPEFA 技术开展层序地层研究 [J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(6): 703-708.
LU S X, ZHANG H Z, MENG E, et al. Application of INPEFA technique to carry out sequence-stratigraphic study[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(6): 703-708. (in Chinese with English abstract)

[56] 周建. 小波变换在兴城地区营四段层序地层划分研究中的应用 [D]. 黑龙江 大庆: 东北石油大学, 2014.
ZHOU J. Application of wavelet transform in studies of sequence stratigraphy of K_1y_4 of Xingcheng[D]. Daqing, Heilongjiang: Northeast Petroleum University, 2014. (in Chinese with English abstract)

[57] MEYERS P A, ISHIWATARI R. Lacustrine organic geochemistry-an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments[J]. Organic Geochemistry, 1993, 20(7): 867-900.

[58] 赵伟, 邱隆伟, 姜在兴, 等. 小波分析在高精度层序单元划分中的应用 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009, 33(2): 18-22.
ZHAO W, QIU L W, JIANG Z X, et al. Application of wavelet analysis in high-resolution sequence unit division[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(2): 18-22. (in Chinese with English abstract)

[59] SCHWARZACHER W. Sedimentation models and quantitative stratigraphy[M]. Amsterdam, New York: Elsevier Scientific Pub., 1975.

[60] THOMSON D J. Spectrum estimation and harmonic analysis[J]. Proceedings of the IEEE, 1982, 70(9): 1055-1096.

[61] 宋翠玉, 吕大炜. 米兰科维奇旋回时间序列分析法研究进展 [J]. 沉积学报, 2022, 40(2): 380-395.
SONG C Y, LYU D W. Advances in time series analysis methods for milankovitch cycles[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(2): 380-395. (in Chinese with English abstract)

[62] 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, 2011, 36(3): 409-428.
WU H C, ZHANG S H, FENG Q L, et al. Theoretical basis, research advancement and prospects of cyclostratigraphy[J]. Earth Science, 2011, 36(3): 409-428. (in Chinese with English abstract)

[63] 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.
HUANG C J. The current status of cyclostratigraphy and astrochronology in the Mesozoic[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(2): 48-66. (in Chinese with English abstract)

[64] HINNOV L A. New perspectives on orbitally forced stratigraphy[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2000, 28: 419-475.

[65] WEEDON G P. Time-series analysis and cyclostratigraphy[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003.

[66] 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.

[67] 王蒙. 陆相盆地古湖平面变化的重建与天文驱动力: 以北美上三叠统纽瓦克盆地和中国东部古近系盆地为例 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2021.
WANG M. Reconstruction and astronomical driving forces of paleolake level change in continental basins: A case study of Upper Triassic Newark Basin in North America and Paleogene Basin in East China[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2021. (in Chinese with English abstract)

[68] CAO H Y, JIN S D, SUN M, et al. Astronomical forcing of sedimentary cycles of Late Eocene a)Liushagang Formation in the Bailian Sag, Fushan Depression, Beibuwan Basin, South China b) Sea[J]. Journal of Central South University, 2016, 23: 1427-1438.

[69] 汪新伟, 郭彤楼, 沃玉进, 等. 垭紫罗断裂带深部构造分段特征及构造变换作用 [J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(2): 220-228.
WANG X W, GUO T L, WO Y J, et al. Characteristics of deep structural segmentation and transformation of the Yaziluo fault zone[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2): 220-228. (in Chinese with English abstract)

[70] 张浩东, 邹长春, 彭诚, 等. 基于测井频谱分析的松科二井登娄库组地层沉积速率研究 [J]. 地球学报, 2022, 43(5): 654-664.
ZHANG H D, ZOU C C, PENG C, et al. A study on the sedimentation rate of the Denglouku Formation from CCSD SK-2, based on logging spectral analysis[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2022, 43(5): 654-664. (in Chinese with English abstract)

[71] WALTHAM D. Milankovitch period uncertainties and their impact on cyclostratigraphy[J]. Journal of Sedimentary Research, 2015, 85(8): 990-998.

[72] 卢树藩, 陈祎, 罗香建, 等. 贵州石炭系黑色页岩层系沉积特征及分布规律研究 [J]. 沉积学报, 2021, 39(3): 672-685.
LU S F, CHEN Y, LUO X J, et al. Sedimentary characteristics and distribution of the Carboniferous black shale in Guizhou Province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(3): 672-685. (in Chinese with English abstract)

[73] 王向东, 胡科毅, 郅文昆, 等. 中国石炭纪综合地层和时间框架 [J]. 中国科学 (地球科学), 2019, 49(1): 139-159.
WANG X D, HU K Y, QIE W K, et al. Carboniferous integrative stratigraphy and timescale of China[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2019, 49(1): 139-159. (in Chinese with English abstract)

[74] 李莹, 王向东, 胡科毅, 等. 中国石炭纪岩石地层划分和对比 [J]. 地层学杂志, 2021, 45(3): 303-318.
LI Y, WANG X D, HU K Y, et al. Lithostratigraphic subdivision and correlation of the Carboniferous in China[J]. Journal of Stratigraphy, 2021, 45(3): 303-318. (in Chinese with English abstract)

[75] LI M S, KUMP L R, HINNOV L A, et al. Tracking variable sedi-

mentation rates and astronomical forcing in Phanerozoic paleoclimate proxy series with evolutionary correlation coefficients and hypothesis testing[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 501: 165-179.

[76] LIANG Y T, TANG X, ZHANG J C, et al. Origin of Lower Carboniferous cherts in southern Guizhou, South China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2022, 590: 110863.

[77] CRAMPTON J S, MEYERS S R, COOPER R A, et al. Pacing of Paleozoic macroevolutionary rates by Milankovitch grand cycles[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(22): 5686-5691.

[78] 赵玉光, 许放松, 刘宝珺. 上扬子台地西缘峨眉地区三叠纪高频层序与海平面振荡研究 [J]. 岩相古地理, 1996(01): 1-18.
ZHAO Y G, XU F S, LIU B J. High-frequence sequences and sea-level oscillations in the Emei area on the western margin of the Upper Yangtze Platform[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 1996(01): 1-18. (in Chinese with English abstract)

[79] 王必金, 包汉勇, 刘皓天, 等. 川东红星地区吴家坪组富有机质页岩特征与发育控制因素 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 70-81.
WANG B J, BAO H Y, LIU H T, et al. Characteristics and controlling factors of the organic-rich shale in the Wujiaping Formation of the Hongxing area, eastern Sichuan Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 70-81. (in Chinese with English abstract)

[80] 张蕊. 塔里木盆地钻孔记录的中更新世以来轨道与亚轨道尺度上的气候变化 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2020.
ZHANG R. Climate changes on orbital and suborbital scales recorded by boreholes in Tarim Basin since the Middle Pleistocene[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2020. (in Chinese with English abstract)

[81] 石巨业, 金之钧, 刘全有, 等. 天文旋回在页岩油勘探及富有机质页岩地层等时对比中的应用 [J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 142-151.
SHI J Y, JIN Z J, LIU Q Y, et al. Application of astronomical cycles in shale oil exploration and in high-precision stratigraphic isochronous comparison of organic-rich fine-grain sedimentary rocks[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 142-151. (in Chinese with English abstract)

[82] 史彪, 吴丰, 李树新, 等. 海陆过渡相优质页岩测井识别: 以鄂尔多斯盆地大宁−吉县地区山 2 段为例 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(2): 115-126.
SHI B, WU F, LI S X, et al. Logging identification of high-quality shale of the marine-continent transitional facies: An example of the Shan 2 Member of the Daning-Jixian area in the Ordos Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(2): 115-126. (in Chinese with English abstract)

[83] 徐健, 德勒恰提·加娜塔依. 米兰科维奇旋回识别与天文标尺的建立: 以莫索湾地区莫 21 井三工河组一段为例 [J]. 地质科技通报, 2021, 40(2): 197-207.
XU J, DELEQIATI J. Identification of Milankovich cycle and establishment of astronomical ruler: A case study from the First Section of the Sangonghe Formation of Well Mo_{21} in Mosuowan area[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(2): 197-207. (in Chinese with English abstract)

[84] WEI R, ZHANG R, LI M S, et al. Obliquity forcing of lake-level changes and organic carbon burial during the Late Paleozoic Ice Age[J]. Global and Planetary Change, 2023, 223: 104092.

[85] FANG Q, WU H C, WANG X L, et al. Astronomical cycles in the Serpukhovian-Moscovian (Carboniferous) marine sequence, South China and their implications for geochronology and icehouse dynamics[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 156: 302-315.

[86] HECKEL P H, ALEKSEEV A S, BARRICK J E, et al. Choice of conodont *Idiognathodus simulator* (*sensu stricto*) as the event marker for the base of the global Gzhelian Stage (Upper Pennsylvanian Series, Carboniferous System)[J]. Episodes, 2008, 31(3): 319-325.

[87] HECKEL P H, ALEKSEEV A S, BARRICK J E, et al. Cyclothem ["digital"] correlation and biostratigraphy across the global Moscovian-Kasimovian-Gzhelian stage boundary interval (Middle-Upper Pennsylvanian) in North America and eastern Europe[J]. Geology, 2007, 35(7): 607.

Summary for “黔西南下石炭统打屋坝组页岩的天文旋回识别及层序地层划分”

Orbital cycle recognition and sequence stratigraphic division of the Lower Carboniferous Dawuba Formation shales in Southwest Guizhou

WANG Jiawei[1a, 1b]，JIN Siding[1a, 1b*]，WEI Xiangfeng[2]，HAO Jingyu[2]，CHEN Yicai[1a, 1b]，LI Luyan[1a, 1b]，MA Chao[1b, 1c]

1a. College of Energy；1b. National Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation；1c. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China；

2. SINOPEC Exploration Company, Chengdu 610041, China

First author，E-mail：1091924996@qq.com

* Corresponding author， E-mail：jinsiding@cdut.edu.cn

Abstract： The Lower Carboniferous Dawuba Formation in Southwest Guizhou hosts a shale sequence with significant exploration potential. Current disagreements regarding its sequence division scheme and developmental mechanisms have somewhat hindered the understanding of the spatial distribution patterns of this high-quality shale.[**Objective**] Therefore, this study focuses on the Lower Carboniferous Dawuba Formation shale (interval 1 457–2 466 m) from the Well Qian Shui Di-1 in Southwest Guizhou. [**Methods**] Utilizing the natural gamma ray (GR) log as a proxy indicator, methods including time series analysis, INPEFA (integrated noise-enhanced population evolutionary frequency analysis), and wavelet analysis were applied to conduct cyclostratigraphic and sequence stratigraphic investigations. The aim is to achieve a "quantitative" division of the sequence stratigraphy for this shale unit from an astronomical forcing perspective. [**Results**] The results demonstrate that the Dawuba Formation shale records clear astronomical periodic signals. COCO (correlation coefficient) analysis estimates an optimal average sedimentation rate of 16.4 cm/ka, corresponding to a sediment thickness of 66.42 m for the 405 ka long eccentricity cycle. Spectral analysis and astronomical tuning were performed on segmented GR data from the Well Qian Shui Di-1 (upper segment: 1 457-1 932 m; lower segment: 1 932-2 466 m). The optimal sedimentation rates for the upper and lower segments are 16.5 cm/ka and 11.2 cm/ka, respectively. The entire Dawuba Formation recorded 19 long eccentricity cycles, enabling the establishment of a "floating" astronomical time scale, which estimates a total duration of approximately 7.86 Ma for the formation. Furthermore, relative sea-level change curves were reconstructed using sedimentary noise modeling (DYNOT and ρ1 methods).Building upon the temporal framework established by cyclostratigraphy, and integrating relative sea-level extrema, INPEFA, and wavelet analysis results, six third-order sequence boundaries were identified, dividing the formation into five third-order sequences. The development of these third-order sequences is interpreted to be controlled by a stable approximately 1.2 Ma obliquity amplitude modulation cycle. [**Conclusion**] By applying cyclostratigraphy to the sequence division of the Dawuba Formation shale, this study explores the relationship between astronomical orbital parameters and relative sea-level change at different temporal scales, achieving the division of both third-order and fourth-order sequences. This methodology enables potential high-resolution (10 000-year scale) chronostratigraphic correlation of marine shales. It provides a refined temporal framework for predicting intervals of high-quality source rock development within shale sequences, thereby offering crucial theoretical guidance for shale oil and gas exploration.

Key words: cyclostratigraphy； time series analysis； sequence stratigraphy； sea-level change； obliquity amplitude modulation；shale；Southwest Guizhou

Received：2023-09-26；Revised：2023-10-24；Accepted：2024-01-18

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230546