

文章编号: 0253-9985(2009)05-0648-09

# 旋回层序地层的控制因素

王起琮

(西安石油大学 油气资源学院, 陕西 西安 710065)

摘要: 旋回层序是受天文周期控制的, 以最大洪泛面为顶、底界的, 由进积叠加到退积叠加构成的有成因联系的沉积地层, 是天文周期的真实记录。以鄂尔多斯盆地 Sh99 井延长组为例, 应用离散小波变换方法对 GR 曲线进行了信号分解, 并进行了各细节分量的频谱分析。根据各细节分量的优势频率比值与天文频率比值之间的对应关系, 确定了与各天文周期对应的沉积旋回, 并在延长组绝对地质年龄约束下划分了旋回层序。研究表明, 以天文周期为依据、以小波变换及频谱分析为手段可以合理并有效地开展旋回层序划分。

关键词: 小波变换; 频谱分析; 天文频率; 旋回层序; 延长组; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE121.3 文献标识码: A

## Controlling factors of cyclic sequence stratigraphy

Wang Qicong

(School of Petroleum Resources, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shanxi 710065, China)

Abstract: Cyclic sequence is a set of sedimentary formations with genetic relationship that are deposited in a cycle from prograding to retrograding controlled by astronomical periods and bounded by maximum flooding surfaces. It records faithfully the shifting of astronomical periods. The article takes the Yanchang Formation in Well Sh99 from Ordos Basin for an example, discusses the signal decomposition and reconstruction of GR curve by using filtering DWT as well as spectrum analysis technique. The correspondent sedimentary cycle of each astronomical cycle is identified based on the relationship between master frequency ratios and astronomical frequency ratios. The cyclic sequences of the Yanchang Formation are identified with the absolute geologic age as constraints. The research shows that the division of cyclic sequence can be carried out reasonably and effectively with discrete wavelet transformation and spectrum analysis technique on the ground of the astronomical cycles.

Key words: discrete wavelet transform; spectrum analysis; astronomical period; cyclic sequence; Yanchang Formation; Ordos Basin

## 1 沉积旋回与旋回层序

沉积旋回是具有旋回特征的沉积地层的统称, 而旋回层序则具有时间、尺度以及成因概念, 特指顶底由层序界面限定和内部相对整合的具有旋回特征的沉积地层。高分辨率层序地层学将地层基准面自低位至高位再到低位形成的一套有成因联系的沉积地层称为基准面旋回层序, 简称旋

回层序<sup>[1~4]</sup>, 旋回地层学将在一个特定天文周期中形成的一套沉积地层称为旋回层序或全球旋回层序<sup>[5]</sup>。前者强调地层基准面旋回对旋回层序的控制作用, 而后者则强调天文因素对旋回层序的控制作用。事实上由于天文因素是控制地球内、外动力地质作用的根本原因, 因此作为构造运动、气候变迁、沉积物供给以及海或湖平面变化综合作用结果的地层基准面旋回也同样受天文因素控制, 因此地层基准面旋回的时间周期与相应级次

收稿日期: 2008-12-08

第一作者简介: 王起琮 (1961—), 女, 副教授, 层序地层及储层地质。

基金项目: 国家科技重大专项课题 (2008ZX05005-004-09HZ); 陕西省教育厅专项科研计划项目 (08JK408)。

的天文周期应该具有同步特征。

Frazier(1974)曾提出沉积幕式的沉积作用模式,即快速的沉积作用和强烈的地表侵蚀作用发生在两次最大洪泛期之间的沉积幕,其间相对基准面或构造活动处于相对稳定状态,沉积盆地内堆积了由向盆地进积以及向物源区退积的沉积体系组合。而最大洪泛期物源区与沉积区之间地势高差降至最小,沉积盆地水侵范围达到最大,地表侵蚀及沉积速度降至最低,盆地沉积中心处于无沉积状态。在长期而缓慢的沉积状态下,地表形成了广泛分布的由细粒沉积物构成的凝缩层,凝缩层作为层序界面不但是良好的地层对比标志,也是确定的地层等时界面<sup>[6,7]</sup>。因此文中将旋回层序定义为在特定天文周期内形成的、顶底以最大洪泛面为界的、内部具有成因联系的、由进积叠加到退积叠加构成的一套沉积地层。

## 2 天文周期与旋回层序

天文周期是天文地质学中的重要概念,指对地球发生作用的天体动力系统的运动及作用周期,包括银地、日地和月地系统周期。天文地质学研究成果表明宇宙环境及天体间万有引力、恒星的热及电磁辐射变化等是引发地球内、外动力地质作用的主要原因,地球所处的宇宙环境确定了其构造及气候条件,地质旋回与天文周期具有明显的对应关系<sup>[8]</sup>。沉积地层作为地质作用过程的响应成为地质历史及天文周期的真实记录<sup>[8,9]</sup>。

### 2.1 银地系统与旋回层序

银地系统时间尺度一般在 2 Ma 以上,沉积旋回规模一般在 100 m 以上。银地系统中太阳系自远到近再到远银心点运行一周时间为 200 ~ 300 Ma 目前太阳系处于近银心点位置。银河系近银心点万有引力常数  $G(6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2)$ , 太阳辐射量及太阳斥力小,使地核呈离心运动,地表气候偏冷,地球半径增加,火山喷发减弱,形成陆海各半球分布格局及大范围海退<sup>[8,10]</sup>,而远银心点万有引力常数  $G(7.00 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2)$ , 太阳辐射量及太阳斥力大,地核呈向心运动,地球半径缩小,火山喷发强烈,地表气候温暖,形成陆海均匀分布格局及大范围海侵。太阳系绕银心运动过程在沉积地层中的表现为全球规模的海退到海侵沉积以及沉

积物快速及巨厚堆积到缓慢及薄层堆积中<sup>[8]</sup>。

据星系运动学理论太阳系绕银心的运动方式是沿银道面上、下螺旋式前进运动,穿越银道面的时间间隔为 30 ~ 40 Ma 往返周期为 60 ~ 80 Ma 据计算最近的太阳系穿越银道面的时间约为 3 Ma 即晚上新世时期<sup>[8,11]</sup>。宇宙物质集中的银道面对太阳系产生强大的引力扰动和引潮效应,造成地球各圈层物理条件急剧变化,从而引发各圈层同期灾变效应,如构造运动、气候突变、生物灭绝及磁极倒转等。因此将穿越银道面间的平稳期称为自然周期,而穿越银道面的突变期称为自然临界期<sup>[11]</sup>。自然周期一般对应于大型沉积盆地从诞生到消亡的周期,盆地内形成完整的盆地充填序列。克拉通盆地由于具有稳固基底,往往需要一到两个往返银道面周期方可形成一个较大规模的盆地充填序列,因此将 60 ~ 120 Ma 称为克拉通热旋回周期<sup>[8]</sup>。

太阳系运动过程中周期性地与奥特星团或其等质量星团相遇,引起太阳辐射量变化,从而导致全球气候以及全球海平面发生较大规模的周期性变化,变化周期在 2 ~ 5 Ma 之间,一般为 3 Ma 左右,称之为奥特周期<sup>[9,11]</sup>,其间沉积盆地中形成明显的较大规模的进积与退积沉积旋回,经典层序地层学将其定义为三级层序或称之为正层序<sup>[9]</sup>。

### 2.2 日地系统与旋回层序

日地系统时间尺度一般在 0.01 ~ 1.50 Ma 之间,沉积旋回规模一般在 0.5 ~ 100.0 m 之间。日地系统的天文周期主要为黄道偏心率  $e$  黄赤交角  $\epsilon$  及岁差周期  $\omega$  统称为地球轨道周期或米兰克维奇旋回。黄道偏心率目前为 0.016 7, 变化范围 0.000 5 ~ 0.060 7, 长周期为 0.405 Ma 平均短周期 0.100 Ma 黄赤交角  $\epsilon$  目前为  $23^\circ 27'$ , 变化范围  $22^\circ 02' \sim 24^\circ 30'$ , 平均周期 0.041 Ma 岁差  $\omega$  目前为  $281^\circ 45'$ , 变化范围  $0^\circ \sim 360^\circ$ , 平均周期 0.021 Ma<sup>[11]</sup>。A. Berger 的计算结果表明轨道偏心率长、短周期为 0.405 和 0.100 Ma 具有长期稳定的特征,而岁差和黄赤交角周期自古至今则逐渐增加,据计算显生宙 (0 ~ 500 Ma) 两个岁差周期分别为 0.019 ~ 0.023 Ma 和 0.016 ~ 0.019 Ma 两个黄赤交角周期分别为 0.035 ~ 0.054 Ma 和 0.029 ~ 0.041 Ma<sup>[12]</sup>。根据 A. Berger 的计算方法得出晚三叠世 (200 ~ 228 Ma) 明显的岁差周期为 0.021

Ma和 0.018 Ma 黄赤交角周期为 0.043 Ma和 0.035 Ma 偏心率短周期为 0.123 Ma 偏心率长周期为 0.405 Ma<sup>[13-14]</sup>。由于天体运动的特有规律使得天文周期之间具有相对稳定的比例关系,以晚三叠世为例,地球轨道参数之间的比例为: 0.405 : 0.123 : 0.043 : 0.035 : 0.021 : 0.018 = 1.00 : 3.29 : 9.42 : 11.57 : 19.01 : 22.75。

地球轨道周期是日地系统天体对地球运动多种干扰作用的结果,使地球运动轨迹具有周期性变化特征,并导致地表接收太阳辐射量及气候具周期性变化<sup>[15]</sup>,在沉积盆地内表现为沉积物类型、通量以及堆积速度的周期性变化并形成多级小规模沉积旋回,而且多级沉积旋回厚度间的比例关系与相应的多级天文周期期间的比例关系相关联,即具有一致的比例关系。由此沉积地层通过旋回的厚度记录了地质历史中的天文周期信息。

根据显生宙 (0 ~ 500 Ma) 的天文周期<sup>[10]</sup>可将古生界至新生界的旋回层序级次相应地划分为旋回层序  $C_G$  (银河年 200 ~ 300 Ma)、旋回层序  $C_K$  (克拉通热旋回周期 60 ~ 80 Ma)、旋回层序  $C_N$  (自然周期 30 ~ 40 Ma)、旋回层序  $C_O$  (奥特周期 2 ~ 5 Ma)、旋回层序  $C_Q$  (长偏心率  $Q$ : 1.0 ~ 1.3 Ma)、旋回层序  $C_R$  (长偏心率  $R$ : 0.405 Ma)、旋回层序  $C_A$  (短偏心率  $A$ : 0.095 ~ 0.131 Ma)、旋回层序  $C_B$  和  $C_C$  (黄赤交角周期 0.035 ~ 0.054 和 0.029 ~ 0.041 Ma) 及旋回层序  $C_E$  和  $C_F$  (岁差周期 0.019 ~ 0.023 和 0.016 ~ 0.019 Ma)。

### 3 小波变换及频谱分析技术

小波变换是近年迅速发展起来的先进的信号处理技术,在信号滤波、特征信号检测以及复杂信号分解等方面具有强大的优势。自然伽马测井数据是多频率成分叠合而成的复杂信号,属于非平稳随机信号,其采样周期为 0.125 m,采样频率为 8 点 /m。应用小波分析技术对反映碎屑岩地层旋回特征的自然伽马曲线进行信号分解可以得到反映各级旋回层序特征的分解信号,通过频谱分析可以检测地层总的频率特征以及各级旋回层序的频率特征,根据天文周期与旋回层序的对应关系,检测天文周期信息并开展旋回层序划分及对比研究。

#### 3.1 小波变换基本概念

1) 小波基函数  $\psi(t)$ : 具局部非零定义域并在

有限区域内迅速衰减、积分为零的波形函数<sup>[16]</sup>,满足以下条件,其中  $t$  为时间变量:

$$\Psi(0) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

2) 小波基函数  $\psi(t)$  的傅立叶变换  $\Psi(\omega)$ :  $\Psi(\omega)$  满足容许及完全重构条件,其中  $\omega$  为频率变量:

$$C_\psi = \int_R \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (2)$$

3) 小波序列  $\psi_{ab}(t)$ : 应用尺度  $a$  和平移距  $b$  将小波基函数  $\psi(t)$  伸缩与平移得到  $\psi_{ab}(t)$ :

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3)$$

4) 连续小波变换系数  $W_f(a, b)$ : 随机信号  $f(t)$  与小波序列  $\psi_{ab}(t)$  褶积运算得到  $W_f(a, b)$ :

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (4)$$

5) 小波变换重构信号  $f(t)$ : 连续小波变换系数  $W_f(a, b)$  与小波序列  $\psi_{ab}(t)$  反褶积运算得到重构  $f(t)$ :

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (5)$$

6) 离散型小波序列  $\psi_{mn}(t)$ : 将小波序列  $\psi_{ab}(t)$  的尺度  $a$  幂级数离散化、平移距  $b$  均匀离散化 ( $a_m = a_0^m$ ,  $b_n = nb_0$ 。设  $m, n$  为整数,  $a_0 = 2$ ,  $b_0 = 1$ ) 得到  $\psi_{mn}(t)$ :

$$\psi_{mn}(t) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}t - n) \quad (6)$$

7) 离散小波变换系数  $WT_z(m, n)$ : 随机信号  $x(t)$  与离散小波序列  $\psi_{mn}(t)$  褶积得到  $WT_z(m, n)$ :

$$WT_z(m, n) = \sum_{i=1}^n 2^{-m/2} \psi(2^{-m}t_i - n) x(t_i) \quad (7)$$

8) 离散小波变换重构信号  $f(t)$ : 离散小波变换系数  $W_f(a, b)$  与离散小波序列  $\psi_{ab}(t)$  反褶积得到重构  $f(t)$ :

$$f(t) = C \sum_{-\infty}^{\infty} \sum_{-\infty}^{\infty} WT_z(m, n) \psi_{mn}(t) \quad (8)$$

#### 3.2 一维离散小波变换及频谱分析

文中应用 Matlab7.5 的小波分析工具,对鄂尔多斯盆地靖边地区 Sh99 井上三叠统延长组 (830 ~ 2 202 m) 的自然伽马测井数据 (GR) 进行了离散小波变换及频谱分析研究。

对于砂泥岩地层而言, 泥质沉积易于吸附放射性元素, 表现为高自然伽马特征, 砂质沉积吸附放射性元素的能力弱, 表现为低自然伽马特征。连续及厚层的泥质沉积一般是高可容空间的沉积产物, 叠置的厚层砂质沉积往往为低可容空间的沉积产物, 因而自然伽马测井曲线成为反映地层粒度变化以及沉积环境变化的主要资料, 在区域地层对比过程中具有重要的作用。但详细的地层

对比需要应用多条测井曲线进行综合分析。文中作为研究方法试验仅选择了自然伽马测井曲线。

由于自然伽马测井曲线包含多种频率成分, 因此在选择小波类型时考虑了尺度及平移距变化范围较大的 dbN 小波。该小波具有在时域上有限支撑及长度有限, 在频域上  $\Psi(\omega)$  在  $\omega=0$  处有  $N$  阶零点,  $\psi(t)$  和它的整数位移  $\psi(t-\tau)$  正交归一等特征<sup>[14]</sup>。这些特征决定了 dbN 小波可有效地

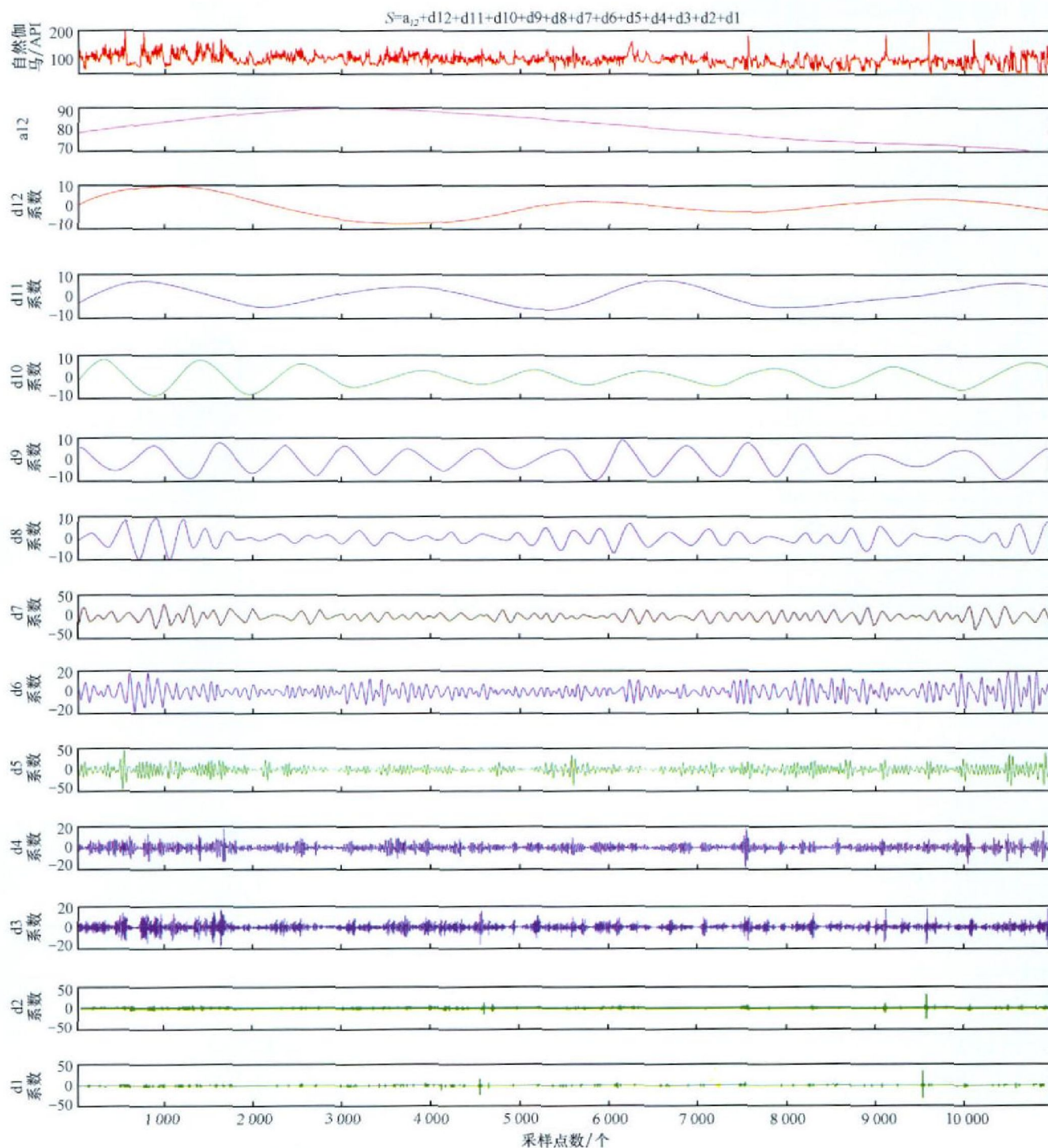


图 1 Sh99井三叠系延长组(830~2 202 m)GR曲线 db30小波 11尺度一维分解结构

Fig 1 1-D decomposed structure plot of the DWT db30 at 11 level for the Yanchang Formation in Well Sh99 (883—2 202 m)

分解含多种频率成分的复杂信号,且选用  $N$  值较大的小尺度  $dbN$  小波可较好地解决小波变换过程中的混频现象<sup>[17]</sup>。

加载数据后首先选择  $db30$  小波对信号进行 11 尺度一维分解,得到近似分量  $a_{12}$  和细节分量  $d_{11}, d_{10}, \dots, d_1$  (图 1)。然后应用小波强制消噪方法,分析各细节分量的频谱特征,即选定某一高频信号并将消噪阈值置 0 其余高频信号的消噪阈值置于最大,执行降噪处理后得到降噪后的重构信号,对重构信号进行频谱分析,得到其频谱及优

势频率。据晚三叠世各天文频率比例与各细节分量频率比例间的关系,确定了天文周期信息主要隐含于细节分量  $d_3, d_4, d_6, d_8, d_9, d_{11}$ 。

通过小波强制降噪处理,得到由  $d_6, d_8, d_9, d_{11}$  重构的信号 (图 2a), 重构信号的自相关函数  $R(\tau)$  显示信号具有窄频带缓慢衰减的特征 (图 2b), 重构信号的频谱显示对应于奥特周期、偏心率长周期  $Q$ 、偏心率长周期  $P$ 、偏心率短周期 (天文频率比例为  $0.31:1.00:2.47:8.13=1.00:3.25:8.02:26.42$ ) 的频率分别为  $0.000\ 366\ 0.001\ 371$

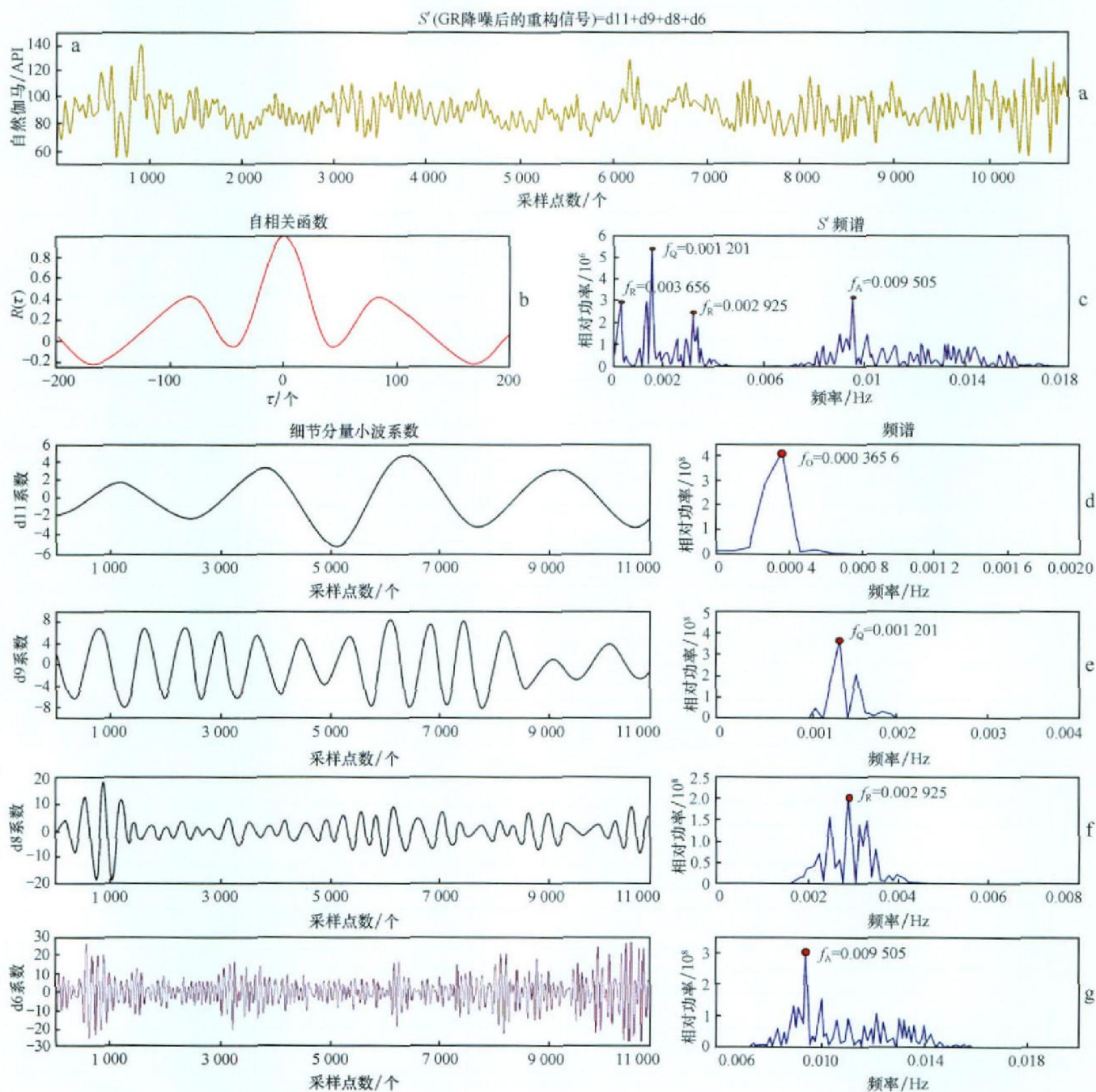


图 2 Sh99 井延长组 (883 ~ 2 202 m) GR 曲线  $d_6, d_8, d_9, d_{11}$  重构信号与各细节分量及其频谱

Fig. 2 Reconstructed signals and detailed DWT components of  $d_6, d_8, d_9, d_{11}$  from the GR curve and their spectrograms for the Yanchang Formation in Well Sh99 (830–2 202 m)

0.002 925 0.009 505 (图 2c), 频率比例为 1.00 : 3.75 : 8.00 : 26.00 与天文频率比例相近。图 2 中 d e f g 分别为 d6 d8 d9 d11 细节分量及其频谱和各优势频率。

由于黄赤交角与岁差周期及频率随时间而变化, 高频信息需分段进行频谱分析, 因此本文截取了 Sh99 井延长组上部长一段 (830 ~ 1 008 m) 自然伽马曲线进行高频信号分析。通过小波降噪处理得到由 d3 d4 重构的信号 (图 3a), 自相关函数显示信号具有宽频带快速衰减的特征 (图 3b), 重构

信号的频谱显示对应于 2 个黄赤交角周期和 2 个岁差周期 (天文频率比例为 23.26 : 28.57 : 46.95 : 56.18 = 1.00 : 1.23 : 2.02 : 2.42) 的谱峰频率分别为 0.027 70 0.034 74 0.057 61 0.067 72 (图 3c), 频率比例为 1.00 : 1.27 : 2.11 : 2.47, 与 2 个黄赤交角周期和 2 个岁差 0 周期的天文频率比例相近。图 3 中 d e 为细节分量 d4 经 db10 小波 5 尺度分解后的细节分量  $d_{4_4}$ ,  $d_{3_4}$  及其频谱和优势频率, 图 3 中 f g 为细节分量 d3 经 db10 小波 5 尺度分解后的细节分量  $d_{4_3}$ ,  $d_{3_3}$  及其频谱和优势频率。

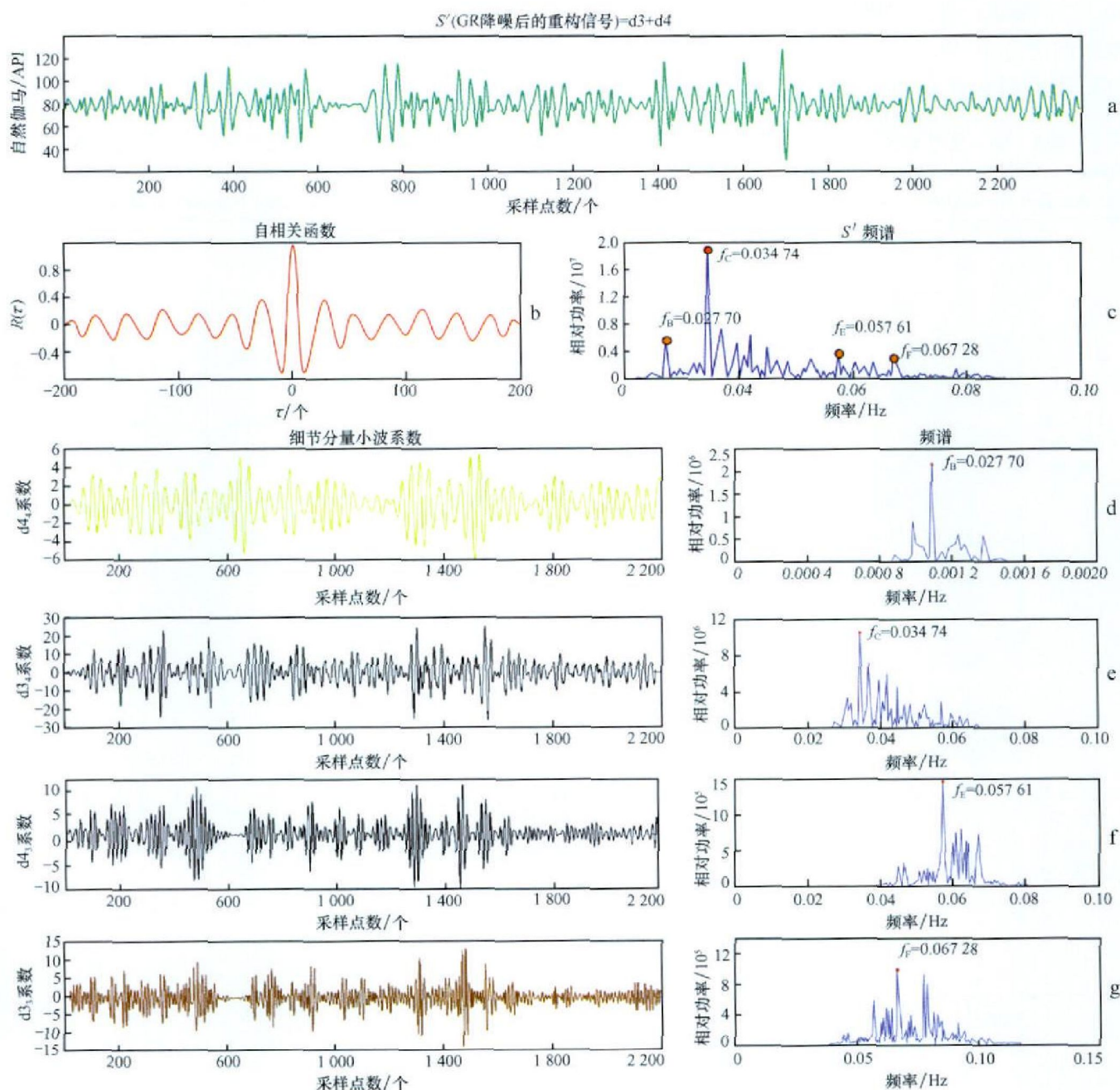


图 3 Sh99 井延长组长一段 (883 ~ 1 008 m) GR 曲线 d3 d4 重构信号与各细节分量及其频谱

Fig 3 Reconstructed signals and detailed DWT components of d3 and d4 from the GR curve and their spectrograms for the first member of the Yanchang Formation in Well Sh99 (830–1 008 m)

## 4 天文周期识别与旋回层序划分

据 2007 年国际地质年表, 上三叠统延长组 (瑞替阶、诺利阶和卡尼阶) 沉积时限为 199.6 ~ 228.0 Ma<sup>[12-13]</sup>, 绝对地质年龄为 28.4 Ma 中三叠统上段纸坊组 (拉丁阶) 沉积时限为 228.0 ~ 237.0 Ma 绝对地质年龄为 9 Ma<sup>[18-19]</sup>。因此按照天文周期的时限范围, 中、上三叠统的纸坊组与延长组形成于自然周期。延长组的绝对地质年龄为 28.4 Ma 是开展延长组旋回层序划分的基本约束条件。根据细节分量 d11、d9、d8、d6、d4、d3 划分的各级沉积旋回的数目分别为 4、13、32、104、298、380

630、736 每个沉积旋回的沉积时限可以根据延长组绝对地质年龄 28.4 Ma 除以沉积旋回个数计算, 计算结果显示各沉积旋回的沉积时限均约为相关天文周期的 2 倍, 即每个沉积旋回可划分为 2 个在 1 个天文周期中形成的旋回层序 (表 1)。陶明华先生将这种现象称为沉积旋回的二分性, 即高级别沉积旋回内往往包含 2 个次一级旋回, 高级旋回间呈现强差异性, 而次级旋回间则呈现弱差异性<sup>[20]</sup>。

按照以上旋回层序划分方法, Sh99 井延长组旋回层序可划分为 8 个旋回层序 C<sub>0</sub> (171 m 左右), 26 个旋回层序 C<sub>Q</sub> (52 m 左右); 64 个旋回层序 C<sub>R</sub> (21.4 m 左右) (图 4); 208 个旋回层序 C<sub>A</sub>

表 1 晚三叠世天文周期、频率及其比值与 Sh99 井自然伽马曲线 (GR) 离散小波变换细节分量频率及其比值  
Table 1 Astronomical periods and frequencies and their ratios vs frequency of the Late Triassic and master frequencies of detailed db30 DW T components of the GR curve and their ratios in the Triassic Yanchang Formation of Well Sh99

| 天文周期、<br>频率、频率<br>比值         | 天文<br>周期 | 名称       | 奥特周期           | 偏心率长周期         |                | 偏心率短周期         | 黄赤交角周期         |                | 岁差周期           |                |
|------------------------------|----------|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                              |          | 代号       | O              | Q              | R              | A              | B              | C              | E              | F              |
|                              |          | 时限 /Ma   | 3.250          | 1.000          | 0.405          | 0.123          | 0.043          | 0.035          | 0.021          | 0.018          |
|                              |          | 数目 /个    | 9              | 28             | 70             | 231            | 660            | 811            | 1333           | 1596           |
|                              |          | 频率 /Hz   | 0.308          | 1.000          | 2.469          | 8.130          | 23.256         | 28.571         | 46.948         | 56.180         |
|                              | 天文频率比值   |          | 1.00           | 3.25           | 8.02           | 26.42          | 75.58          | 92.86          | 152.58         | 182.58         |
|                              |          |          |                | 1.00           | 2.47           | 8.13           | 23.26          | 28.57          | 46.95          | 56.18          |
|                              |          |          |                |                | 1.00           | 3.29           | 9.42           | 11.57          | 19.01          | 22.75          |
|                              |          |          |                |                |                | 1.00           | 2.86           | 3.51           | 5.77           | 6.91           |
|                              |          |          |                |                |                |                | 1.00           | 1.23           | 2.02           | 2.42           |
|                              |          |          |                |                |                |                |                | 1.00           | 1.64           | 1.97           |
|                              |          |          |                |                |                |                |                |                | 1.00           | 1.20           |
| 自然伽马<br>曲线离散<br>小波变换<br>细节分量 | 细节<br>分量 | 代号       | d11            | d9             | d8             | d6             | d4             |                | d3             |                |
|                              |          | 优势频率 /Hz | 0.000366       | 0.001201       | 0.002925       | 0.009505       | 0.027260       | 0.034740       | 0.057610       | 0.067280       |
|                              | 优势频率比值   |          | 1.00           | 3.29           | 8.00           | 26.00          | 74.56          | 95.02          | 157.58         | 184.03         |
|                              |          |          |                | 1.00           | 2.44           | 7.91           | 22.70          | 28.93          | 47.97          | 56.02          |
|                              |          |          |                |                | 1.00           | 3.25           | 9.32           | 11.88          | 19.70          | 23.00          |
|                              |          |          |                |                |                | 1.00           | 2.87           | 3.65           | 6.06           | 7.08           |
|                              |          |          |                |                |                |                | 1.00           | 1.27           | 2.11           | 2.47           |
|                              |          |          |                |                |                |                |                | 1.00           | 1.66           | 1.94           |
|                              |          |          |                |                |                |                |                |                | 1.00           | 1.17           |
| 离散小波<br>变换分析<br>结果           | 沉积<br>旋回 | 厚度 /m    | 341.9          | 104.1          | 42.7           | 13.2           | 4.6            | 3.6            | 2.2            | 1.9            |
|                              |          | 数目 /个    | 4              | 13             | 32             | 104            | 298            | 380            | 630            | 736            |
|                              | 旋回<br>层序 | 代号       | C <sub>0</sub> | C <sub>Q</sub> | C <sub>R</sub> | C <sub>A</sub> | C <sub>B</sub> | C <sub>C</sub> | C <sub>E</sub> | C <sub>F</sub> |
|                              |          | 厚度 /m    | 171.0          | 52.0           | 21.4           | 6.6            | 2.3            | 1.8            | 1.1            | 0.9            |
|                              |          | 数目 /个    | 8              | 26             | 64             | 208            | 597            | 760            | 1261           | 1473           |

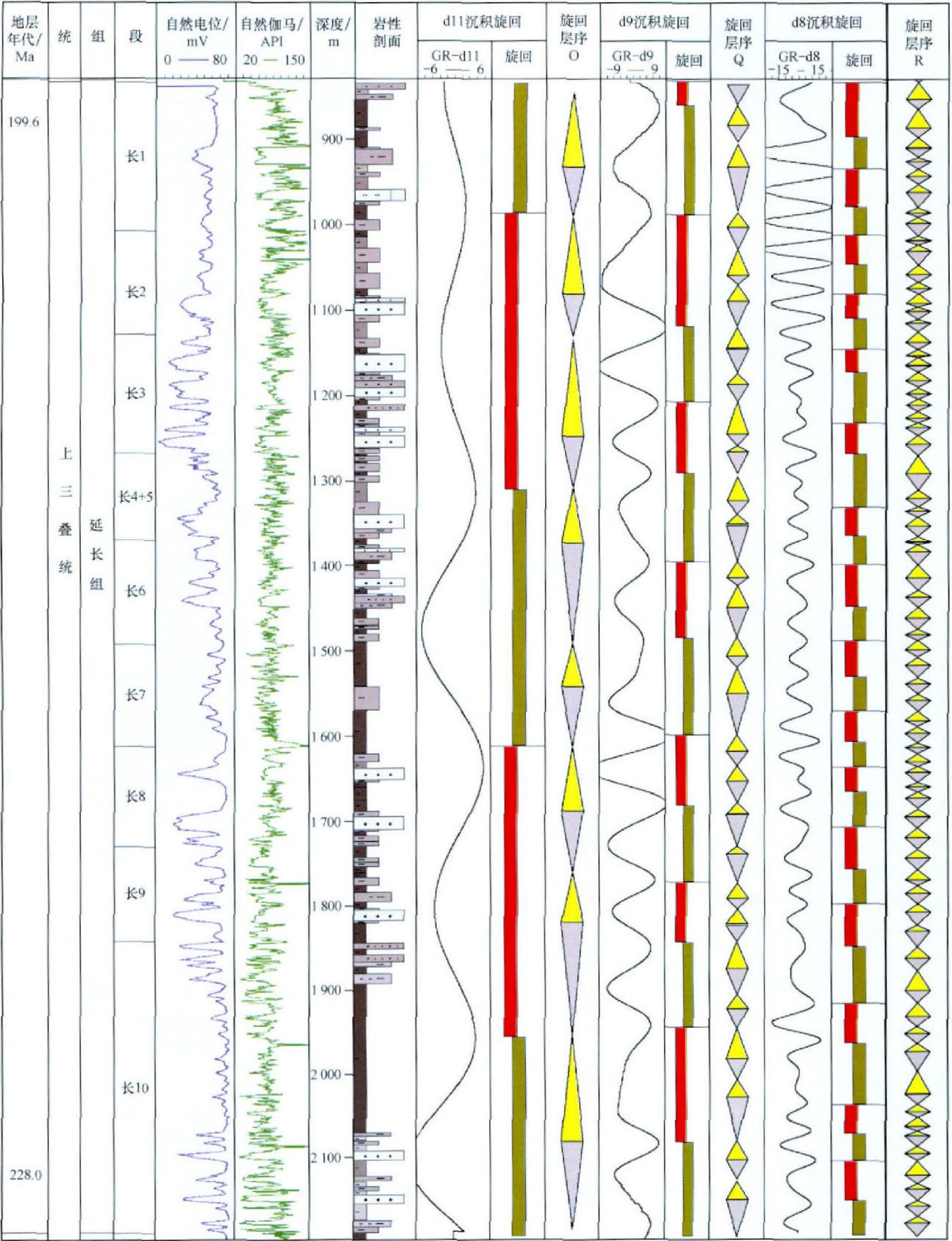


图 4 鄂尔多斯盆地靖边地区 Sh99井三叠系延长组 (830 ~2 202 m)旋回层序划分

Fig.4 Cyclic sequence division for the Yanchang Formation in Well Sh99 (883—2 202 m), Jingbian area the Ordos Basin

(6.6 m 左右); 597 个旋回层序  $C_B$  (2.3 m 左右); 760 个旋回层序  $C_C$  (1.8 m 左右); 1 261 个旋回层序  $C_E$  (1.1 m 左右) 及 1 473 个旋回层序  $C_F$  (0.9 m 左右) (表 1)。

天文周期中偏心率长周期  $R$  (时限 0.405 Ma) 是天文周期中最为稳定的地球轨道参数, 该周期作为地表气候变化的最基本“节律”, 稳定地存在于各地质年代<sup>[21]</sup>。因此按延长组绝对地层年龄 28.4 Ma 和偏心率长周期  $R$  的时限 0.405 Ma 计算, 延长组应包含 70 个旋回层序  $C_R$ 。Sh99 井延长组的旋回层序  $C_R$  包含于细节分量  $d8$  沉积旋回, 据此划分出 64 个旋回层序  $C_R$ , 缺失了 6 个旋回层序  $C_R$ , 按其平均厚度 21.4 m 计算, 则 Sh99 井延长组顶部缺失的地层厚度约 132 m。

## 5 结论

1) 依据天文周期开展旋回层序划分与对比以及地层定年是目前地层学一级层序地层学研究的新的方向, 地层绝对地质年龄在层序划分过程中具有重要的约束作用, 因此在不同级次层序或旋回层序划分过程中要考虑天文周期控制因素, 并将通过各种手段获得的地层绝对地质年龄作为层序或旋回层序划分的依据。

2) 在层序及旋回层序研究过程中除了依据地层岩性、物性以及沉积构造等表观特征的变化规律之外, 应用如小波变换、频谱以及时频分析等数学方法进行各类连续的地层物理及化学信息的变化规律研究, 有助于目前进一步开展定量地层学或定量层序地层学的研究。

## 参 考 文 献

- 1 Cross T A. Controls on coal distribution in transgressive-regressive Cycles, Upper Cretaceous, Western Interior USA [A]. In: Wilgaus C K. Sea-level changes approach [C]. SEPM Special Publication, 1988, 42: 371—380
- 2 邓宏文, 王洪亮, 李熙吉. 层序地层基准面的识别对比技术及应用 [J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(3): 177—184
- 3 邓宏文, 吴海波, 王宁, 等. 河流相层序地层划分方法——以松辽盆地白垩统扶余油层为例 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(5): 621—627
- 4 郑荣才, 叶泰然, 翟文亮, 等. 川西坳陷上三叠统须家河组砂体分布预测 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(3): 405—417
- 5 吴智勇, 姜衍文. 全球旋回地层学述评 [J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(3): 15—21
- 6 Frazier D E. Depositional episodes: their relationship to quaternary stratigraphic framework in the northwestern portion of the Gulf Basin [J]. University of Texas at Austin Bureau of Economic Geology Geological Circular, 1974, 74(1): 1—28
- 7 Galloway W E. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis: architecture and genesis of flooding surface bounded depositional units [J]. AAPG Bulletin, 1989, 17(2): 125—142
- 8 徐道一, 杨正宗, 张勤文, 等. 天文地质学概论 [M]. 北京: 地质出版社, 1983. 29—41, 216—229
- 9 王鸿楸, 史晓颖. 沉积层序及海平面旋回的分类级别——旋回周期的成因讨论 [J]. 现代地质, 1998, 12(1): 1—16
- 10 杨学祥. 地质旋回与天文周期 [J]. 东北地震研究, 1996, 12(2): 24—30
- 11 史晓颖. 35 Ma——地质历史上一个重要的自然周期 [J]. 地球科学, 1996, 21(3): 235—242
- 12 Berger A. Stability of the astronomical frequencies over the earth's history for paleoclimate [J]. Science, 1992, 255: 560—565
- 13 金之钧. 塔里木盆地波动过程及其控油规律 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003. 77—79
- 14 张小会, 赵重远. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组米兰科维奇旋回的确定 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 23(4): 373—375
- 15 汪品先. 编制地球的“万年历” [J]. 自然杂志, 2006, 28(1): 1—5
- 16 葛哲学, 陈仲生. Matlab 时频分析技术及其应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006. 12—13
- 17 杨建国, 夏松波, 须根法, 等. 小波分解与重建中产生频率混淆的原因与消除算法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(2): 61—64
- 18 童金南, 殷鸿福. 国际三叠纪年代地层研究进展 [J]. 地层学杂志, 2005, 29(2): 131—136
- 19 殷鸿福, 童金南. 关于中国海相三叠系建阶及下三叠统分阶界线 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(5): 490—497
- 20 陶明华, 邹伟宏, 支崇远, 等. 地球圈层长周期演化旋回基本特征 [J]. 同济大学学报, 2003, 31(12): 1 416—1 420
- 21 汪品先. 地质计时的天文“钟摆” [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(1): 2—7

(编辑 张亚雄)