

济阳坳陷车镇凹陷沙河街组旋回地层学研究

郎旭娟¹, 余继峰^{1,2}, 付文钊¹, 李卿¹, 陈鹏¹

(1. 山东科技大学 地质科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘要: 选定车镇凹陷沙河街组车古29等7口井测井资料依次从西南向东北方向进行旋回地层学研究。借助Matlab软件平台及其小波变换工具箱, 基于前期建立的米氏周期识别方法——米氏周期最佳匹配分析方法, 对7口井测井资料中识别出来的周期进行剔除和选择, 进而确定地层中记录的优势米氏周期。通过沉积速率计算及沉积厚度变化的分析, 揭示了该区地层中米氏旋回发育规律及三角洲、湖盆发育特征, 标定了不同层段年龄。研究发现: 车镇凹陷沙河街组地层中广泛发育米氏旋回层, 高频信息比较多; 该区三角洲、湖盆从西南向东北大体上呈推进(扩张)—萎缩—推进(扩张)的差异性; 周期比较长的米氏旋回(偏心率长周期)易于在沉积速率小的层段保存, 周期比较短的米氏旋回(岁差、黄赤交角)易于在沉积速率大的层段保存; 根据计算结果, 推断车镇凹陷沙一段顶界年龄在31.5~32.5 Ma, 沙二段顶界年龄在32.7~33.2 Ma, 其中车古29、车古35、车古203、大古63井的沙一段顶界年龄分别为32.4, 32.4, 32.1, 32.5 Ma。

关键词: 车镇凹陷; 沙河街组; 米兰科维奇旋回; 小波变换; 沉积速率

中图分类号: P539

文献标志码: A

Study on cyclostratigraphy of Shahejie Formation in Chezhen Sag, Jiyang Depression

LANG Xu-juan¹, YU Ji-feng^{1,2}, FU Wen-zhao¹, LI Qing¹, CHEN Peng¹

(1. College of Geological Sciences and Engineering, Shandong University Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Minerals, Qingdao 266590, China)

Abstract: Chegu29 wells which distributed from southwest to northeast were selected for the study of Milankovitch cycle. With the help of Matlab software and Wavelet transform toolbox and on the basis of the previously constructed recognition method of Milankovitch cycle, cycles identified from logging data of seven wells were selected and then the dominant Milankovitch cycles recorded in strata were determined. The development regularity of Milankovitch cycle and the development characteristic of delta and basin were revealed, the age of strata was calibrated by the analysis of sedimentary rate and depositional thickness. It is found that Milankovitch cycles are widely developed in Chezhen Sag. The development of the low-frequency informations is inferior to the high-frequency ones. The delta and basin exhibit difference of expansion-shrinking-expansion from southwest to northeast, the relatively low-frequency cycles (Eccentricity) are prone to be preserved in the stratum whose sedimentary rate is lower, the high-frequency ones (Precession, Obliquity) are prone to be preserved in the stratum whose sedimentary rate is higher. According to calculation, the age of top boundary of the Member 1 of Shahejie Formation ranges from 31.5 to 32.5 Ma, and the age of top boundary of the Member 2 of Shahejie Formation is from 32.7 to 33.2 Ma. The ages of the uppermost strata of the Member 1 of Shahejie Formation of Chegu29, Che35, Chegu203, Dagu63 wells are 32.4, 32.4, 32.1, 32.5 Ma respectively.

Key words: Chezhen Sag; Shahejie Formation; Milankovitch cycle; wavelet transform; sedimentary rate

收稿日期: 2011-10-28 责任编辑: 韩晋平

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41072076); 研究生科技创新基金资助项目(YCA110317)

作者简介: 郎旭娟(1985—), 女, 山东潍坊人, 硕士。E-mail: langlan77@163.com。通讯作者: 余继峰(1964—), 男, 安徽萧县人, 教授。E-mail: yujifeng05@163.com

米氏旋回层的研究具有重要的地质意义,例如可以准确预测今后气候变化趋势提供重要依据,为含油气盆地地层成因机制和过程等的研究提供新的途径^[1-7]。但是笔者发现,前人对车镇凹陷沙河街组地层方面的研究甚少,车镇凹陷研究及勘探程度远不及济阳拗陷的其他 3 个次级凹陷,这反映出车镇凹陷仍有较大的资源潜力。

因此,笔者选定了车镇凹陷由西南向东北分布的车古 29,车 35,车古 208,车古 202,车古 203,大 51,大古 63 共 7 口井来作米氏旋回层的研究,它们的平面位置如图 1 所示,确定分层数据见表 1。

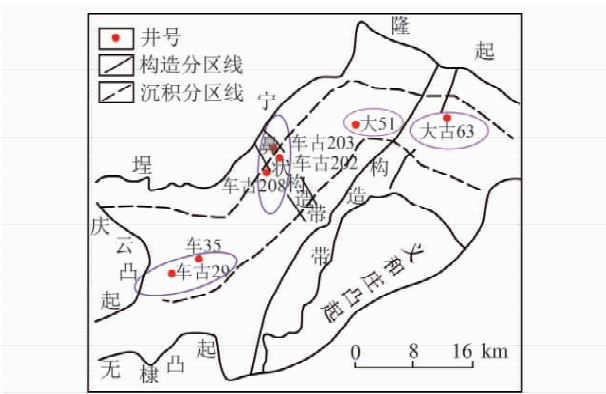


图1 车镇凹陷构造及各井地理位置(据文献[8]修改)
Fig. 1 Tectonic and the location of wells of Chezhen Sag

表1 车镇凹陷车 35 等井的沙河街组分层位及底深

Table 1 Well depths of the basal boundaries of the Shahejie Formation of Chezhen Sag								m	
层段	车古 29	车 35	车古 208	车古 202	车古 203	大 51	大古 63		
沙一段	1 615.0	1 925.5	2 339.5	2 277.5	2 121.0	3 120.5	2 268.4		
沙二段	1 800.0	2 258.5	2 706.0	2 645.0	2 365.0	3 676.5	2 347.6		
沙三段	1 962.9	2 501.5	3 586.0	3 024.0	2 936.0	3 831.5	2 503.6		
沙四段	2 644.0	3 100.0	3 708.0	3 180.6			2 600.1		
总厚度	1 091.0	1 318.5	1 625.5	1 127.6	1 006.0	1 129.5	540.7		

1 研究区地质概况

车镇凹陷是渤海湾盆地济阳拗陷东北部的一个次级凹陷(图 1),是一个北断南超,近东西向的“S”型陆相箕状断陷盆地,面积约为 2 390 km²。构造上自西向东划分为车西、大王北和郭局子 3 个洼陷;自南向北可分为南部缓坡带、中央洼陷带和北部陡坡带等 3 个次级构造单元。车镇凹陷北邻埕子口凸起,东有庆云凸起,无棣凸起,南有义和庄凸起,与沾化凹陷相邻(图 1),凹陷内发育多个断层,主要呈 NE 走向。其古近系主要由东营组和沙河街组地层组成,沙河街组整合于东营组之下,自下而上分为沙四段、沙三段、沙二段和沙一段(图 2),沉积了一套以泥岩、砂岩和砾岩为主的碎屑岩系。沙四段主要为湖泊相沉积,沙三段有段较长时期的稳定沉降期,后断陷萎缩,主要为半深湖-深湖沉积体系,沙一时湖盆整体抬升扩张,主要以三角洲沉积相为主^[8-10]。

2 地层中米氏旋回层的识别

2.1 米氏旋回层提取方法

自从米氏理论建立以来,前人采取了多种方法来研究,主要有快速傅里叶变换、Walsh 频谱分析、Hilbert-Huang 变换、小波变换法、Blackman-Tukey 法^[11-12]等。同时,为消除“噪音”干扰,还涉及到应用各种过滤、光滑技术、数据插值运算等^[13-15]。其中小

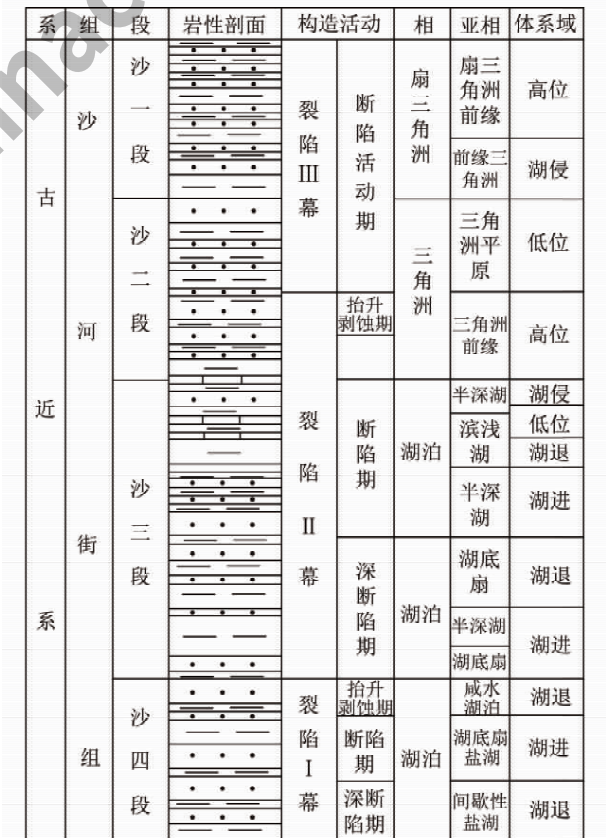


图2 车镇凹陷沙河街组综合柱状图(据文献[8]修改)
Fig. 2 Generalized stratigraphic log for the Shahejie Formation of Chezhen Sag

波变换理论是近几十年发展起来的新的信号处理技

术,由于它在时间域和频率域同时具有较高的分辨率,故被称为“数学显微镜”,被广泛应用于数值信号处理领域。它是泛函分析、Fourier 分析、样条分析、调和分析最完美的结晶。小波变换分支内容较多,本文仅涉及一维连续小波变换。

由于气候系统变化相对于天文轨道的变化具有一定的滞后性,即地质记录的时间标尺和地球轨道参数的变化不完全准确一致,所以米氏旋回被识别出来之后的检验若在时间域上进行困难较大。研究表明,频率上的检验比较有效,即在频率域上对比地质记录与地球轨道理论值之间的线性关系^[14]。学者们认为,米氏旋回及其各周期之间的比率关系在一定的地质时期具有相对的稳定性,若能够从地层所包含的各种旋回中找到与米氏周期比率相等的关系就认为此旋回是米氏旋回的响应,这种方法被称为米氏周期最佳匹配分析方法^[17],本文对米氏周期的识别也是基于此方法。

首先对测井数据经过消噪、归一化等预处理^[18],然后对信号进行连续小波变换,变换结果是一个表示尺度域和时间域(厚度、深度)的小波系数矩阵,矩阵的行表示不同的尺度,矩阵的列表示不同的时间(厚度或深度)位置。基于 Matlab 平台,对小波系数矩阵作一系列操作运算,得到一小波系数的模极大值曲线图(图 3),这些极大值点就代表了原始信号中的优势周期。需要注意的是,多数情况下,通过程序运算会识别出很多优势周期,此时要对这些周期进行选择,选择的原则为:①模极大值曲线图上响应好的点;②符合米氏周期最佳匹配分析方法。即优先选择响应好的点,剔除响应不好的点,就可以分析识别出研究层段中所记录的米氏旋回。

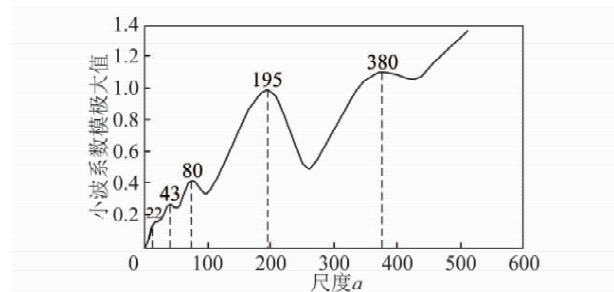


图 3 车镇凹陷大古 63 井沙一段各尺度值下小波系数模极大值曲线

Fig. 3 Wavelet modulus maxima chart of Member 1 of Shahejie Formation in Well Dagu63 of Chezhen Sag

由图 3 可以看出,通过小波变换可以识别出 5 个优势周期 22,43,80,195,380,根据上文所述方法,剔除响应不好的尺度点 $a=22$ 和 $a=380$,尺度 43,80,

195 三者之间的比率为 $1:1.9:4.5$,与对应的米氏旋回岁差周期与黄赤交角周期之比 $1:2$ 的误差不超过 5%,与岁差周期与偏心率短周期之比 $1:5$ 的误差不超过 10%,与黄赤交角与偏心率短周期之比 $2:5$ 的误差不超过 5%,误差在允许范围内^[19-21],认为是米兰科维奇旋回的响应。

2.2 地层中米氏旋回层定量计算

对于利用小波变换识别出来的米氏周期,再借助于小波分析中频率与尺度的对应关系式(1)就可以得到原始信号中记录的米氏周期的大小,即

$$F_a = \frac{F_c}{a\Delta} \quad (1)$$

其中, a 为尺度; Δ 为采样间距; F_c 为小波的中心频率,本文全部是基于 Morlet 小波展开的,所以 $F_c = 0.8125 \text{ Hz}$; F_a 为在尺度 a 下的准频率,在误差允许范围内,可以认为 F_a 即为尺度 a 的真频率。用到实例中,当 Δ 为实际采样厚度(深度)间距时,这样所得出的 F_a 就是单位厚度内的周期个数,那 F_a 的倒数即为优势周期的大小。这种方法称为小波变换模极大值法^[21]。进而可以进行沉积速率等的研究,对于进一步分析沉积环境具有借鉴意义。

3 车镇凹陷米氏旋回层发育特征

3.1 测井数据小波波谱特征

对 7 口井分别都选定自然伽马(GR)参数的测井数据^[22],点距 0.125 m,基于 Matlab 平台,对 7 口井不同层段分别进行小波变换,得到 26 个小波能谱图和 26 个小波系数模极大值曲线图,由于篇幅限制只列出一口井(车古 208)的图(图 4,5)。通过小波变换得到沙一段的模极大值有 $a=26,39,81,170,317,481,485$ 共 7 个值(图 5(a)),根据本文 2.2 中提到的确定米氏周期的方法,剔除响应不好的值 $a=81,317,481$,剩余 $a=26,39,170,485$ (图 4(a),5(a)其他 3 段也作了同样研究图 4(b)~(d),5(b)~(d)),其比值为 $1:1.5:6.5:18.5$,与理论米氏旋回周期 $20.0 \text{ ka}:39.6 \text{ ka}:124.0 \text{ ka}:400.0 \text{ ka}$ (岁差:黄赤交角①:黄赤交角③:偏心率长周期 $\approx 1:1.6:6.5:20$)基本吻合,因此,认为是米氏周期的反映^[23-24]。利用式(1)就可以求出每个周期的厚度为 4.0,6.0,26.2,74.0 m,从而求得相应的沉积速率(R_A)值约为 0.2 mm/a。用同样的方法分别识别出了车古 208 井沙二~沙四段及其他 6 口井的米氏旋回并求出其大小(表 2)。

由表 2 可以看出,米氏旋回层在车镇凹陷地层中广泛发育。总体来看,车镇凹陷研究层段中高频信息

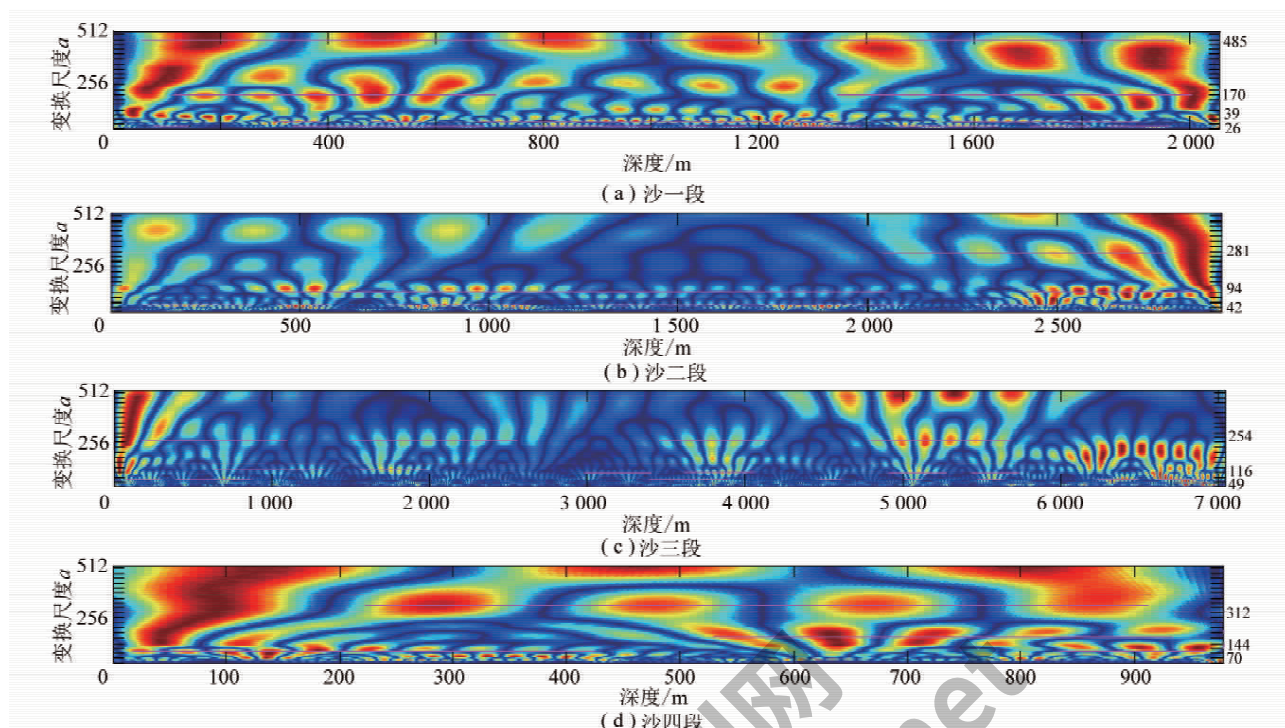


图 4 车古 208 井沙河街组各层段小波变换能谱图

Fig. 4 Spectrograms of Shahejie Formation in Well Chegu208

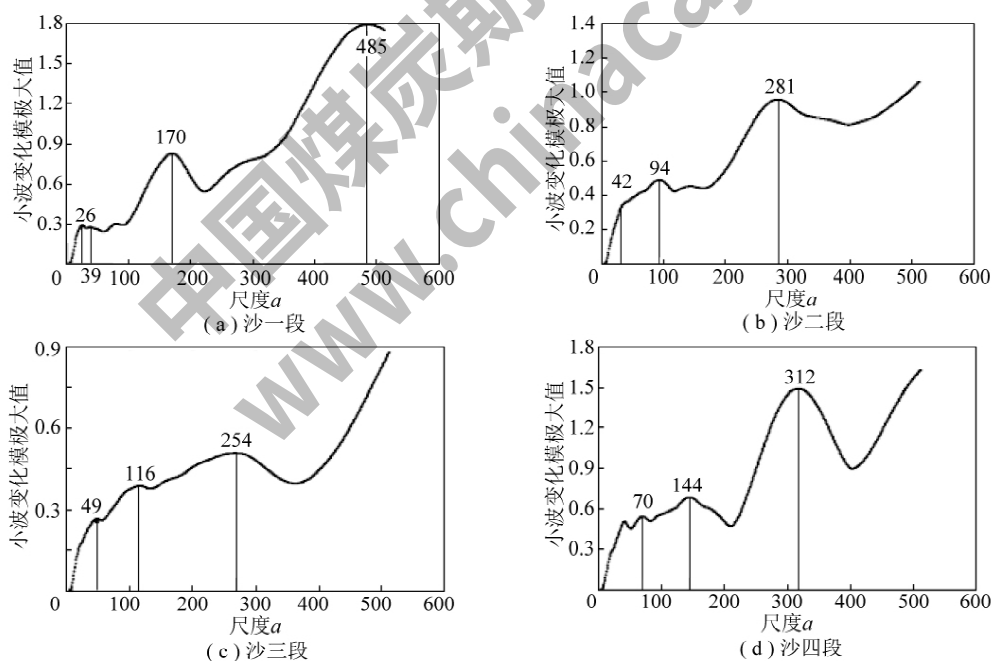


图 5 车古 208 井沙河街组各段小波变换模极大值曲线

Fig. 5 Wavelet modulus maxima chart of Shahejie Formation in Well Chegu208 of Chechen Sag

比较多,几乎所有层段都记录了高频信息,低频信息除了周期最长的 400 ka 偏心率周期和 95,124 ka 的黄赤交角率周期外,其他的低频信息(131,99 ka)发育较好。说明这些层段的沉积环境条件十分相似。

3.2 地层年龄界线的对比

由沙三段顶界年龄 33.8 Ma(国际地层表,2004)

和车古 208 井各段的沉积速率 R_A 值及其地层厚度,计算各段的沉积延续时间和底界年龄,见表 3。由表 3 可知,由本文分析方法推断出沙二段顶界年龄为 32.8 Ma,沙一段顶界年龄为 31.5 Ma,大致可对比与姚益民等的研究结果 32.94,31.83 Ma^[2]。用同样的方法得到其他井各层段的底界年龄,如图 6 所示。

表 2 车镇凹陷各井沙河街组不同层段米氏旋回值对比

Table 2 Cycle stratigraphy comparison of different horizons of Chezhen Sag

层段	沙一段		沙二段		沙三段		沙四段	
	周期/ka	厚度/m	周期/ka	厚度/m	周期/ka	厚度/m	周期/ka	厚度/m
车古 29	23.6/39.6/ 131.0/400.0	4.0/6.0/26.2/ 74.6	20.0/39.6/ 131.0	7.1/12.3/53.5	23.6/41.0/99.0	10.3/19.5/ 48.0	23.6/39.6/ 53.6/131.0	5.5/8.9/ 14.5/29.0
车 35	20.0/53.6/ 99.0/131.0	6.0/14.5/ 29.0/41.8	20/41/ 124	7.6/14.5/43.7	22.4/53.6/99.0	5.2/10.9/ 20.5	41/99/ 400	6.5/16.6/63.0
大 51	20/40/100	6.2/12.2/ 34.2	23.6/39.6/ 53.6/131	13.7/19.5/ 31.5/69.2	20/40	6.2/13.1		
大古 63	20.0/53.6/95.0	6.2/14.5/ 27.5	23.6/53.6/ 400.0	3.2/6.9/52.3	22.4/39.6/ 53.6/400.0	3.5/6.0/9.7/ 64.8	22.4/39.6/ 53.6/400.0	3.5/5.0/7.7/ 67.8
车古 208	20.0/39.6/ 124.0/400.0	4.0/6.0/ 26.2/74.0	20/41/131	6.5/14.5/43.2	20/41/99	7.5/17.8/ 39.0	20/41/99	10.8/22.2/ 48.0
车古 202	20.0/41.0/ 131.0	3.9/6.0/23.5	20.0/41.0/ 53.6/95.0/ 131.0	10.2/20.9/27.2/ 40.2/55.9	20/41/124/ 400	3.8/7.8/ 22.2/69.1	20.0/39.6/ 53.6/131.0	4.6/8.6/ 13.1/30.5
车古 203	23.6/99.0/400.0	4.6/19.1/ 75.8	20.0/53.6/ 95.0/99.0	6.5/16.2/ 29.1/32.6	20.0/53.6/ 131.0	5.7/14.2/ 34.2		

表 3 车古 208 井的沙河街组各段年龄与“国际表”的始新统一渐新统界线年龄对比

Table 3 Comparison of the ages of different horizons of Well Chegu208 and the Eocene-Oligocene boundary in GTS2004

组或段	底界井 深/m	厚度/ m	延续时 间/Ma	底界年 龄/Ma	牛 38 井 ^[23] (2007)/Ma	国际地层表(2004)		
						统	阶	年龄/Ma
东营组					31.83		夏特阶	底 28.4
沙一段	2 339.5	257.0	1.30	31.5	32.94	渐新统	鲁培尔阶	底 33.8
沙二段	2 706.0	366.5	1.00	32.8	33.80			
沙三段	3 586.0	880.0	2.20	36.0		始新统	普利亚本阶	
沙四段	3 708.0	122.0	0.23					

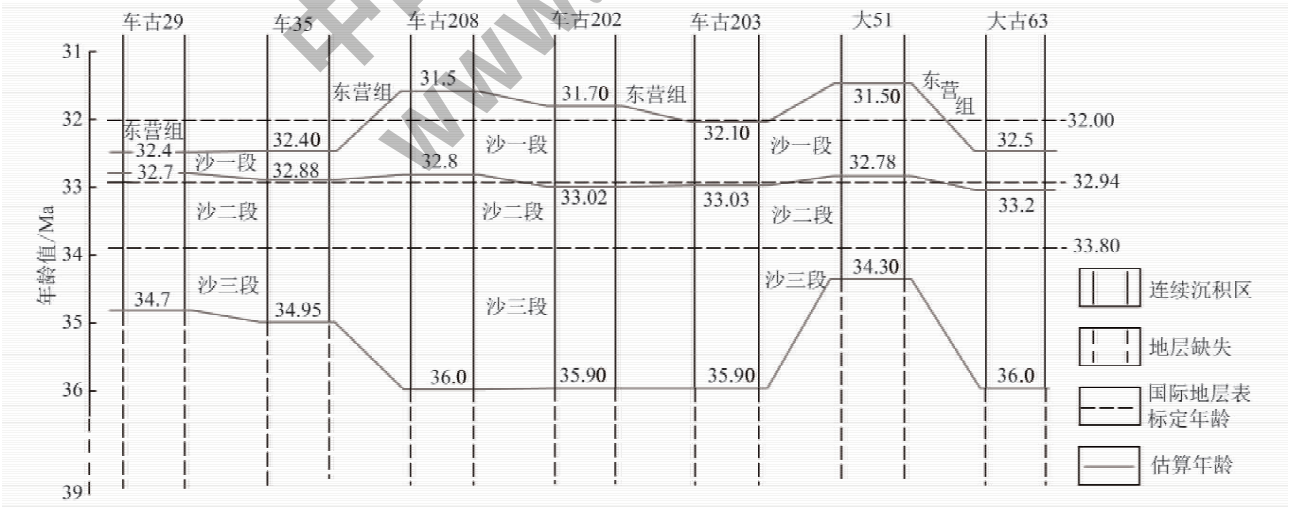


图 6 车镇凹陷等井沙河街组各段的年龄的对比

Fig. 6 Comparison of lower limit age of different horizons of Chezhen Sag

由图 6 可以发现: 通过本文研究方法计算出沙一段顶界年龄在 31.5 ~ 32.5 Ma, 与前人标定的 31.83 Ma 相当; 沙二段顶界年龄在 32.7 ~ 33.2 Ma, 与前人标定的 32.94 Ma 相当^[23]; 其中车古 29、车

35、车古 203、大古 63 井的沙一段顶界年龄分别为 32.4, 32.4, 32.1, 32.5 Ma, 与“中国区域地层表(2001)”提出的渐新统底界年龄 32 Ma 有所差异, 但姚益民等^[23]根据始新统-渐新统界线处古生物特征

的研究,也认为蔡家冲阶的时代应早于 32 Ma;沙三段底界年龄平均值为 35.3 Ma,最大值不超过 36 Ma,远小于国际地层表(2004)标定的巴尔统阶-鲁帝特阶界线年龄 40.2 Ma,说明该区在地质时期内沙三中下亚段有地层的缺失。

3.3 车镇凹陷沉积速率横向对比分析

对车古 29 等 7 口井进行了沉积速率及其沉积持续时间研究(表 4),结果发现车镇凹陷的车古 29 等井的沉积速率从沙一段到沙四段大体呈现小—大—小的趋势。例如车古 29 为 0.18—0.34—0.40—0.22,车 35 为 0.30—0.37—0.21—0.16,车古 203 为 0.19—0.32—0.27 等,而且沉积速率基本是在沙二、沙三段达到最大值,所以这两段的地层沉积厚度平均最大(图 7),沉积速率加快时,有利于储层的形成,沉积速率减慢时有利于盖层的形成,在沉积速率由快变慢的过程中,大陆斜坡或深水区往往发育较好的生油岩^[2],由此也能判断车镇凹陷的沙二、沙三段应富含油层,这与生产实践是相符的(沙二、沙三为主要生油岩层^[1]),侧面反映出本文研究方法切实可行,因此可以进一步加大对这两个层段油气勘探方面的研究。此外车镇凹陷沉积速率的这种有规律的变化现象也反映了沉积环境的微变化:各井沙一段沉积速率基本在 0.2 mm/a 左右,厚度由西南向东北方向逐渐变厚(图 7),这段沉积显示出车镇凹陷湖盆沙一段三角洲是由西南向东北,特别是在大 51 井处较快速的推进;沙二段沉积速率平均基本在 0.4 mm/a 左右,厚度由西南向东北呈薄—厚—薄的变化,在大 51 处突然变大,显示出此段三角洲由西南向东北的推进(扩张)—萎缩—推进(扩张);沙三段与沙二段的变化情况基本一致,说明此段湖盆从西南向东北是扩张—萎缩—扩张;沙四段地层沉积厚度由西南向东北大体是由厚到薄变化,显示出此段湖盆沿此方向大体是萎缩的。各层段旋回厚度由西南向东北方向大体上也呈现出类似的演化,例如沙一段 100 ka 偏心率长周期的厚度,车 35 井处为 29 m,车古 203 井处为 19.1 m,到了大 51 井处增大到 34.2 m,沙二段 131 ka 偏心率长周期的厚度,车古 29 井处为 53.5 m,车古 208 井处为 43.2 m,车古 202 井处为 55.9 m,大 51 井处增大到了 69.2 m。因此,整体来看,车镇凹陷车古 29 等从西南向东北依次展开的共 7 口井的沙河街组的三角洲、湖盆从西南向东北大体上呈推进(扩张)—萎缩—推进(扩张)的变化。

对比表 2 各井不同层段米氏周期识别结果和表 4 各井不同层段沉积速率值可以发现,周期比较长的米氏旋回易于在沉积速率小的层段保存,周期比较短

表 4 车镇凹陷各井沙河街组不同层段沉积速率值对比

Table 4 Comparison of R_A of different horizons of Chezhen Sag

井号	层段	沉积速率/ (mm·a ⁻¹)	持续时间/Ma	厚度/m
车古 208	沙一段	0.19	1.30	257.0
	沙二段	0.33	1.10	366.5
	沙三段	0.40	2.20	880.0
	沙四段	0.52	0.23	122.0
车古 202	沙一段	0.17	1.30	224.5
	沙二段	0.47	0.78	267.5
	沙三段	0.18	2.01	379.0
	沙四段	0.23	0.68	156.6
车古 203	沙一段	0.19	0.99	191.0
	沙二段	0.32	0.77	244.0
	沙三段	0.27	2.12	571.0
车古 29	沙一段	0.18	0.30	62.0
	沙二段	0.34	0.53	185.0
	沙三段	0.40	0.35	162.9
	沙四段	0.22	2.90	681.1
车 35	沙一段	0.30	0.49	144.0
	沙二段	0.37	0.92	333.0
	沙三段	0.21	1.13	243.0
	沙四段	0.16	3.71	598.5
大 51	沙一段	0.32	1.32	418.5
	沙二段	0.42	1.02	556.0
	沙三段	0.31	0.49	155.0
大古 63	沙一段	0.29	0.72	209.0
	沙二段	0.13	0.60	79.2
	沙三段	0.16	1.28	156.0
	沙四段	0.14	0.68	96.5

的米氏旋回易于在沉积速率大的层段保存。例如米氏旋回中最长的 400 ka 偏心率周期仅在车古 29 井沙一段、车 35 井沙四段、大古 63 井沙二~沙四段、车古 208 井沙一段、车古 202 井沙四段、车古 203 井沙一段中保存,这些层段的沉积速率都小于 0.20 mm/a,其中大古 63 井沙二~沙四段的沉积速率为 0.13~0.16 mm/a,是以上所列层段中沉积速率最小的,此层段中除了保存了 400 ka 的偏心率长周期外,其中所记录的黄赤交角和岁差周期也是相对较长的 53.6,22.4 ka,其他层段却是相对较短的 124 ka(偏心率短周期),41 ka(黄赤交角)和 20 ka(岁差);沉积速率比较大的层段例如车古 29 井沙三段沉积速率为 0.4 mm/a,车古 208 井沙三段为 0.4 mm/a,沙四段为 0.52 mm/a,这些层段中记录的米氏旋回都是周期相对较小的,例如 99 ka(偏心率),40 ka(黄赤交角),20 ka(岁差)。

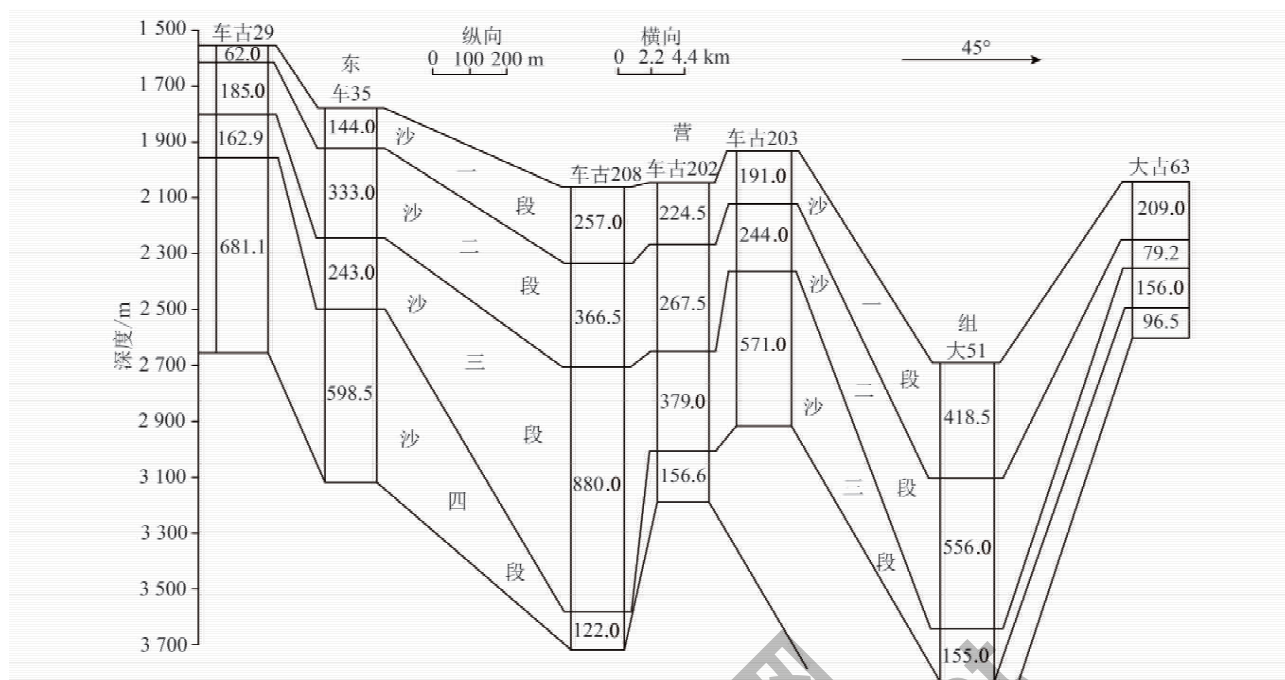


图 7 车镇凹陷各井深度及各层段厚度的对比

Fig. 7 Comparison of thickness and depth of different horizons of Chezhen Sag

4 结 论

(1) 运用小波变换识别地层中记录的米氏周期时不能仅靠比例吻合的原则,要在米氏周期最佳匹配分析方法的基础上进行选择和调整,结合小波变换模极大值曲线图首先剔除响应不好的点。

(2) 车镇凹陷沙河街组地层中广泛发育米氏旋回层。总体来看,高频信息比低频信息更为发育,几乎所有层段都记录了高频信息岁差周期 20 ka,黄赤交角周期 40 ka (39.6 ka); 400 ka 的偏心率长周期仅在沙一、沙四段发育,131,99 ka 的偏心率短周期在沙一~沙四段都有发育; 95,124 ka 的偏心率短周期仅在沙一、沙二段发育,并且记录甚少。

(3) 以沙三段顶界年龄 33.8 Ma 作为本次天文地层年龄的标定(国际地层表,2004),分析计算出车镇凹陷沙一段顶界年龄,沙二段顶界年龄大致可比于前人标定的 31.83 Ma 和 32.94 Ma,其中车古 29,车 35,车古 203,大古 63 井的沙一段顶界年龄分别为 32.4,32.4,32.1,32.5 Ma,比“中国区域地层表(2001)”提出的始新统-渐新统界线年龄 32 Ma 略有提前。

(4) 研究发现,车镇凹陷沙河街组沉积层段的三角洲、湖盆从西南向东北大体上呈推进(扩张)—萎缩—推进(扩张)的变化,并且周期比较长的米氏旋回易于在沉积速率小的层段保存,周期比较短的米氏旋回易于在沉积速率大的层段保存。

参考文献:

- [1] 徐道一,张海峰,韩延本,等. 陆相沉积的天文地层研究方法简介——以井下地层为例 [J]. 地层学杂志,2007,31(S2): 432-437.
- Xu Daoyi, Zhang Haifeng, Han Yanben, et al. Introduction to the method for the astrostratigraphic study of terrestrial sediments: taking underground stratigraphy for an example [J]. Journal of Stratigraphy, 2007, 31(S2): 432-437.
- [2] 吴智勇. 米兰柯维奇韵律层及其年代地层意义 [J]. 地层学杂志,1995,19(2): 156-160.
- Wu Zhiyong. Rhythmites with Milankovitch periods and their chronostratigraphic implications [J]. Journal of Stratigraphy, 1995, 19(2): 156-160.
- [3] 金之钧,李京昌,刘国臣. 米兰科维奇旋回识别问题 [J]. 地学前缘,1997,4(S2): 22.
- Jin Zhijun, Li Jingchang, Liu Guochen. Milankovitch cycle identification problem [J]. Earth Science Frontiers, 1997, 4(S2): 22.
- [4] 丁仲礼. 米兰科维奇冰期旋回理论: 挑战与机遇 [J]. 第四纪研究,2006,26(5): 710-714.
- Ding Zhongli. The milankovitch theory of pleistocene glacial cycles: challenges and chances [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(5): 710-714.
- [5] 张金川,陈建文. 米兰柯维奇理论与地层旋回 [J]. 海洋地质动态,1996(8): 8-9.
- Zhang Jinchuan, Chen Jianwen. Milanovitch cycle theory and stratigraphic cyclicity [J]. Marine Geology Trend, 1996(8): 8-9.
- [6] 齐永安,刘保民,崔建国. 米兰柯维奇旋回及沉积作用 [J]. 焦作工学院学报,1998,17(5): 331-332.
- Qi Yong'an, Liu Baomin, Cui Jianguo. Milankovitch cycle and sedimentation [J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology, 1998, 17

- (5):331-332.
- [7] 邱桂强,刘军,帅 萍. 米氏旋回基本原理及其在陆相湖盆分析中的应用前景 [J]. 油气地质与采收率,2001,8(5):5-8.
Qiu Guiqiang, Liu Jun'e, Shuai Ping. Basic principle of Milankovitch cycle and its prospect in terrigenous lake basin analysis [J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2001, 8(5):5-8.
- [8] 李潇丽,田 成. 山东车镇凹陷东部古近系沙河街组成岩作用 [J]. 古地理学报,2002,4(4):70-72.
Li Xiaoli, Tian Cheng. Diagenesis of Shahejie Formation of the palaeogene in the eastern Chezhen depression of Shandong Province [J]. Journal of Palaeogeography, 2002, 4(4):70-72.
- [9] 施振声,胡 斌,张新培. 山东省东北部车镇凹陷古近系沙河街组滨浅湖沉积中的遗迹群落 [J]. 古生物学报,2005,44(1):96-105.
Shi Zhensheng, Hu Bin, Zhang Xinpei. Ichnocoenosis of shore-shallow lacustrine Shahejie Formation (Paleogene) in Chezhen sag, Jiyang depression of Bohaiwan basin, Shandong [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2005, 44(1):96-105.
- [10] 王 蛟. 车镇凹陷沙河街组层序地层与沉积特征研究 [J]. 新疆石油天然气,2007,3(1):1-4.
Wang Jiao. The research on sequence stratigraphy and depositional model of Shahejie Formation in Chezhen Sag [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2007, 3(1):1-4.
- [11] Schwarzschilder W. Cyclostratigraphy and the Milankovitch theory [J]. Elsevier, 1993.
- [12] Weedon G P. The recognition and stratigraphic implications of orbital-forcing of climate and sedimentary cycles [A]. Paul Wright. Sedimentary Review [C]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1993.
- [13] Yu Jifeng, Guo Kai, Yuan Xuexu, et al. Wavelet denoising of well logs and its geological performance [J]. Energy Exploration & Exploitation, 2010, 28(2):87-95.
- [14] 柳永清. 地球轨道旋回沉积节律研究进展——兼论轨道旋回的沉积学特征、年代学意义和研究方法 [J]. 地球科学进展, 1998, 13(3):221-222.
Liu Yongqing. Advances in the research on orbital forcing sedimentary rhythm: a discussion on the implications to sedimentology, chronology and studying methods [J]. Advance in Earth Sciences, 1998, 13(3):221-222.
- [15] 余继峰,于 泳,付文钊. 测井数据 Matlab 插值与地质旋回性分析应用 [J]. 煤炭学报,2011,36(10):1679-1682.
Yu Jifeng, Yu Yong, Fu Wenzhao. Application of interpolation of well logs based on Matlab to analysis of geological cyclicity [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10):1679-1682.
- [16] Hays J D, Imbrie J & Shackleton N J. Variations in the earth's orbit: pacemaker of the ice age [J]. Science, 1976, 194:1121-1132.
- [17] 张海峰,张林晔,姚益民,等. 东营凹陷沙河街组四段滩坝砂米氏旋回层序划分与对比 [J]. 地层学杂志,2008,32(3):279-281.
Zhang Haifeng, Zhang Linye, Yao Yimin, et al. Milankovitch cycles and sequence division and correlation of the member 4 of the Shahejie Formation in the Dongying depression, Shandong [J]. Journal of Stratigraphy, 2008, 32(3):279-281.
- [18] 公言杰,余继峰. 基于 Matlab 的小波变换在测井层序划分中的应用——以济阳凹陷为例 [J]. 内蒙古石油化工,2009(22):27-29.
Gong Yanjie, Yu Jifeng. Application of Micro-wave transform based on Matlab in well-testing stratification Planning-for Example of Jiyang Hollow. [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2009(22):27-29.
- [19] 李凤杰,郑荣才,罗清林,等. 四川盆地东北地区长兴组米兰科维奇周期分析 [J]. 中国矿业大学学报,2007,36(6):807-810.
Li Fengjie, Zheng Rongcai, Luo Qinglin, et al. Analysis of milankovitch cycles of the Changxing Formation in northeastern Sichuan Basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(6):807-810.
- [20] 李凤杰,王多云,程 微. 应用自然伽玛曲线反演陇东地区延安组沉积旋回 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2005,31(5):474-476.
Li Fengjie, Wang Duoyun, Cheng Wei. Use of natural gamma-ray well log to study sedimentary cycles of Yan'an Formation in Eastern Gansu, Ordos Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2005, 31(5):474-476.
- [21] 余继峰,付文钊,郎旭娟,等. 从地层磁化率数据中提取米兰科维奇旋回信息 [A]. 王 军. 2011 年国际会议模糊系统和神经计算论文集 [C]. 香港,2011:249-251.
- [22] 郭少斌,陈成龙. 利用米兰科维奇旋回划分柴达木盆地第四系层序地层 [J]. 地质科技情报,2007,26(4):27.
Guo Shaobin, Chen Chenglong. Division of sequence stratigraphy of quaternary formation in Qaidam Basin using the Milankovitch Cycle [J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26(4):27.
- [23] 陆先亮,李 琴,栾志安,等. 基于米兰柯维奇理论的地层划分新方法 [J]. 石油大学学报(自然科学版),2003,27(5):4-6.
Lu Xianliang, Li Qin, Luan Zhian, et al. A new method for stratigraphic division based on Milankovitch theory [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003, 27(5):4-6.
- [24] 公言杰,龚 伟. 济阳凹陷石炭-二叠系米氏旋回层识别 [J]. 内蒙古石油化工,2009(23):142-143.
Gong Yanjie, Gong Wei. Jiyang carbon rock sunken cyclic layer identification of permian meters [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2009(23):142-143.
- [25] 姚益民,徐道一,韩延本,等. 山东济阳凹陷始新统-渐新统天文地层界线年龄分析 [J]. 地层学杂志,2007,31(S2):483-491.
Yao Yimin, Xu Daoyi, Han Yanben, et al. Astrostratigraphic age analysis of the eocene-oligocene boundary in the Jiyang Sag, Shandong [J]. Journal of Stratigraphy, 2007, 31(S2):483-491.
- [26] 齐永安,王润怀,潘结南. 米兰柯维奇旋回与高频波动周期的识别 [J]. 焦作工学院学报,2000,19(2):84-85.
Qi Yong'an, Wang Runhuai, Pan Jienan. Milankovitch cycles and the recognition of high-frequency wave period [J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology, 2000, 19(2):84-85.