沉积学报
ACTA SEDIMENTOLOGICA SINICA
ISSN 1000-0550
CN 62-1038/P

基于米氏旋回理论的高频层序识别与划分——以南八仙油气田下油砂山组为例

热依扎沙依热阿特汗,姚宗全,李积永,张源智,郑彬,张士超,刘少鹏,马元琨

引用本文:
热依扎沙依热阿特汗, 姚宗全, 李积永, 等. 基于米氏旋回理论的高频层序识别与划分——以南八仙油气田下油砂山组为例[J]. 沉积学报, 2026, 44(1): 221-234.
REYIZHA Shayireatehan, YAO ZongQuan, LI JiYong, et al. Identification and Division of the High-Frequency Sequence Based on Milakovitch Cycles: A case study of Xiayoushashan Formation in the Nanbaxian oil and gas field[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2026, 44(1): 221-234.

沉积学报 2026年 第44卷 第1期
ACTA SEDIMENTOLOGICA SINICA http://www.cjxb.ac.cn

引用格式：热依扎·沙依热阿特汗，姚宗全，李积永，等.2026. 基于米氏旋回理论的高频层序识别与划分——以南八仙油气田下油砂山组为例[J]. 沉积学报，44(1):221-234.
REYIZHA Shayireatehan, YAO ZongQuan, LI JiYong, et al. 2026. Identification and Division of the High-Frequency Sequence Based on Milakovitch Cycles: A case study of Xiayoushashan Formation in the Nanbaxian oil and gas field[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(1): 221-234.
DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.020 **CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.020**

基于米氏旋回理论的高频层序识别与划分
——以南八仙油气田下油砂山组为例

热依扎·沙依热阿特汗[1,2]，姚宗全[1,2]，李积永[3]，张源智[4]，郑彬[5]，张士超[5]，刘少鹏[5]，马元琨[3]
1.新疆大学地质与矿业工程学院，乌鲁木齐 830000
2.中亚地质矿产信息集成自治区重点实验室，乌鲁木齐 830000
3.中国石油青海油田分公司勘探开发研究院，甘肃敦煌 736200
4.北京源博科技有限公司，北京 102200
5.中国石油青海油田采气二厂，甘肃敦煌 736200

摘 要 **【目的】**通过分析地球轨道周期性变化对气候周期性变化的影响，探讨柴达木盆地下油砂山组的气候变化特征，基于米兰科维奇理论对柴达木盆地下油砂山组建立高分辨率的天文年代标尺，识别和划分高频层序，旨在为油气勘探和资源评价提供参考。**【方法】**利用Laskar算法计算北纬35°夏至日14.5~23.8 Ma期间地球轨道参数变化周期，确定了该沉积期米氏旋回理论和米氏旋回周期比。以南八仙油气田的仙中39井、仙中8-9井及仙中8-12井为例，对自然伽马数据进行频谱和连续小波变换分析。根据轨道周期计算出下油砂山组平均沉积速率，建立了仙中39井的“浮动”天文年代标尺。**【结果】**频谱和连续小波变换分析发现，新近系下油砂山组主要受400 ka和95 ka偏心率周期控制。根据计算结果，下油砂山组平均沉积速率为0.094 41 m/ka，沉积持续时间为7.2 Ma。以400 ka长偏心周期曲线和95 ka短偏心周期曲线作为基准曲线，共鉴定出18个四级准层序组和72个五级准层序。**【结论】**下油砂山组中所记录的气候变化明显受到旋回的控制和驱动。基于米兰科维奇理论识别与划分，能够减少主观因素的影响，提高划分结果的准确性，更准确地刻画沉积物中的气候变化特征。这些研究成果有助于深入理解地球气候演变规律，并为油气勘探和资源评价提供重要参考。
关键词 米氏旋回；频谱分析；小波分析；高频层序；南八仙；柴达木盆地
第一作者 热依扎·沙依热阿特汗，女，1998年出生，硕士研究生，储层沉积学，E-mail: 2938365021@qq.com
通信作者 姚宗全，男，副教授，E-mail: yzq@xju.edu.cn
中图分类号：P539.2 **文献标志码：**A **文章编号：**1000-0550(2026)01-0221-14

0 引言

随着勘探开发的深入，高频层序地层学的划分正朝着半定量和定量的方向发展(Wu *et al.*，2009；任传真等，2019；陈兆芹等，2023)。米兰科维奇旋回理论在古生代和更早的地层以及中生代和新生代地层的研究中被广泛应用，同时已逐渐在三角洲、湖泊和深海的沉积记录中展开研究工作(程日辉等，2008；Guo *et al.*，2008；Zhang *et al.*，2019)。学者充分运用米兰科维奇理论，不仅建立了天文年代标尺，还有效地划分了高频层序。吴怀春等(2008)使用“松科1井”南井测井数据的米氏旋回性分析，估计了青山口组湖泊缺氧事件的持续时间约为250 ka。Huang *et al.*(2011)通过对中国上寺、煤山等标准剖面进行旋回地层学研究，认为二叠/三叠之交的生物大灭绝事件受40 kyr的偏心率驱动控制，持续时间约为

收稿日期：2023-09-07；**修回日期：**2024-01-23；**录用日期：**2024-03-08；**网络出版日期：**2024-03-08
基金项目：国家自然科学基金项目(41902109)；甘肃省油气资源研究重点实验室开放基金项目(SZDKFJJ2023007)；新疆维吾尔自治区“天池英才”计划基金项目(51052300560)

0.7 Myr。魏小松等(2018)通过对涠西南凹陷流沙港组一段天文旋回识别及高频层序划分沉积地层的自然伽马(GR)曲线进行米氏旋回性分析,并结合锆石提供的年代信息,为划分地层高频层序、提高油气勘探精度提供了思路。基于频谱分析和滤波分析等相关方法的使用,金之钧等(1997)利用数字滤波器和频谱分析方法分析了Milankovich在深海的第四纪沉积旋回,为沉积旋回的研究做出了重要贡献。宋明水等(2012)、冯路尧等(2023)、Wei *et al*.(2023)利用傅里叶变换对测井信息进行频谱分析,进而识别出了地层中的米氏旋回,为高频层序划分和沉积作用分析提供了依据。通过连续小波分析与变换,石巨业等(2017)运用频谱分析和连续小波变换对研究区的测井数据进行了米兰科维奇旋回分析,成功实现了对旋回的高精度划分和识别。基于地球化学、测井资料等分析方法的使用,赵军等(2018)利用松辽盆地X油田全区的42口探井测井曲线提取了米兰科维奇旋回信息,并计算了地层剥蚀厚度。目前,利用测井曲线进行米氏旋回研究的工作持续增加,这对于科学地指导盆地的下一步勘探开发计划至关重要。南八仙油气田位于柴达木盆地北缘,是该盆地内的一个重要的油田。然而,对于下油砂山组这一重要油气藏的高精度沉积旋回研究相对较少。因此,运用米氏旋回理论,利用频谱及小波分析方法开展柴达木盆地南八仙油气田下油砂山组高频旋回地层对比与划分研究,旨在为油气勘探和资源评价提供参考。

1 区域地质背景

柴达木盆地是中国西北部中新生代陆相含油气盆地,该盆地位于印度与亚欧两大新生代板块过渡区,形成“三山一盆”的构造格局(汤济广,2007;陈秋实,2014;陈文萍等,2020)。南八仙油气田位于柴达木盆地北缘,在陵间断裂、马仙断裂之间的三角地带,为新近系断背斜气藏,主要受喜马拉雅运动一幕、喜马拉雅二幕的综合控制,在构造区位上,南八仙油气田处于柴达木盆地北缘的大红沟断块隆起带,是一个以背斜为主体的三级构造(颉永琛等,2012;杨国军等,2015;吴文雯,2020)。迄今为止发现的工业油气层均赋存于上新近系下油砂山组中,具有良好的含油气前景(图1)(付锁堂等,2013)。

南八仙油气田新生界由路乐河组(E_{1+2})、下干柴沟组下段(E_3^1)、下干柴沟组上段(E_3^2)、上干柴沟组(N_1)、下油砂山组(N_2^1)、上油砂山组(N_2^2)、狮子沟组(N_2^3)组成(张振铎等,2023)。下油砂山组发育灰色、深灰色、灰绿色、红褐色等杂色泥岩、粉砂岩、细砂岩,偶见砾岩、含藻灰岩、鲕粒灰岩和白云岩夹层(马达德等,2018;宋世骏,2022)。地层保存完整旋回性较强,对环境及气候变化的反应敏感,因此符合本研究要求。根据前人研究成果,柴达木盆地南八仙油气田地层共划分为七个三级层序:SQ1(Tr—T5)、

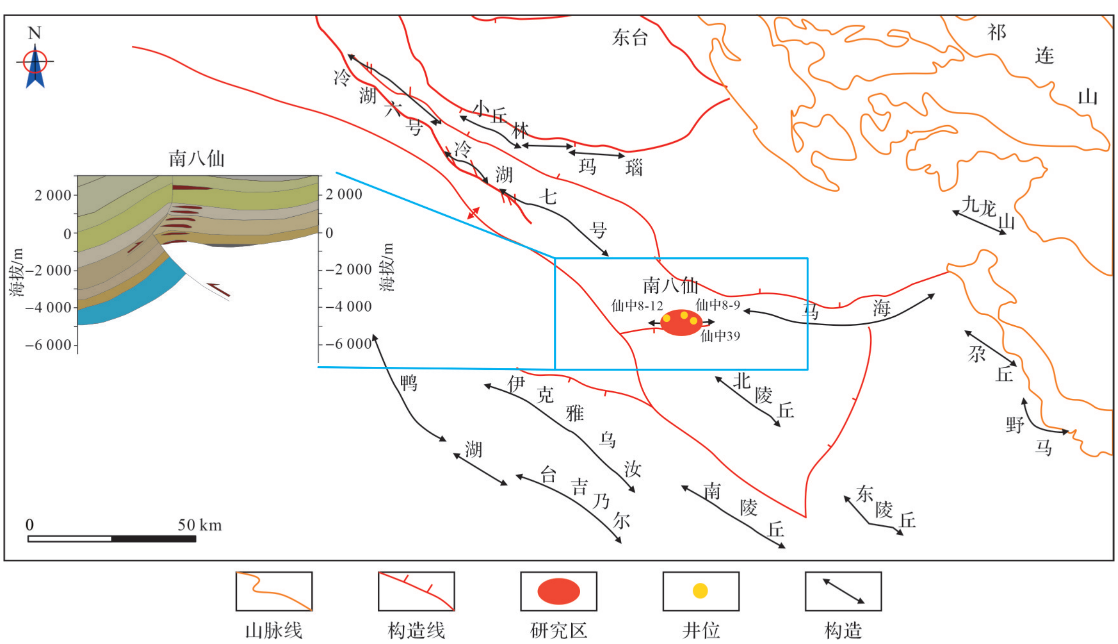

图1 南八仙油气田地质概况

Fig.1 Geological overview of the Nanbaxian oil and gas field

SQ2（T5—T4）、SQ3（T4—T3）、SQ4（T3—T2）、SQ5（T2—T2′）、SQ6（T2′—T1）、SQ7（T1—T0）。其中研究目的层下油砂山组为一个完整的三级层序，沉积时期为14.5~23.8 Ma（图2）（任宪军，2008；王宏波，2011；柯学等，2013）。

2　数据与方法

2.1　自然伽马测井数据

自然伽马测井曲线采样间距均匀，连续测量，分辨率高（陈云等，2021；唐闻强等，2021；黄璞等，2025），是米氏旋回分析的理想数据，它可以敏感地反映沉积物中的含泥量，反映沉积环境的变化以及地表古气候和古环境的变化（Falahatkhah *et al.*，2021；彭军等，2022；徐为鹏等，2023），常作为地层的古气候替代性指标来进行地层旋回研究。本研究选取仙中39井、仙中8-9井和仙中8-12井，对应的下油砂山组深度分别为823.50~1 472.99 m、826.880~1 487.070 m和863.850~1 518.520 m，其测井曲线采样间隔均为0.125 m。

2.2　数据预处理

通过GR数据进行数据预处理使结果更容易解释（Li *et al.*，2019；王涥等，2025）。本文利用Matlab平台的AcycleV2.4.1软件做以下数据处理工作：（1）排序/去重/删空值：使用Sort/Unique/Delete-empty程序包删除偏离正常波动范围内异常值、同一深度的多值、空值；（2）插值：使用Interpolation程序包进行线性插值，保证数据为等间距；（3）去趋势化：去除长期趋势可以确保数据围绕零均值振荡，并避免从极低频分量到更高频率的能量泄漏。使用Detrending程序包中“LOWESS”方法来去除长周期对高频信号的压制。

2.3　时间序列分析

本文采用Matlab平台的AcycleV2.4.1软件对三口井进行频谱分析和小波分析（Li *et al.*，2019；宋翠玉和吕大炜，2022；王涥等，2025）。Multi-taper（MTM）频谱分析用于将数据从深度域转换到频率域。频谱图中的横坐标表示频率，其倒数是相应地层旋回的厚度。频谱分析是一种用于分析信号频率成分的方法。它将信号分解为不同频率的成分，并计算每个频率成分的幅值。频谱分析被用于分析自然伽马数据中的频率成分，以确定地层受到的主要米兰科维奇周期的控制，并与理论轨道周期进行比对，从而识别出地层中的米氏旋回响应（贾东力等，2018；Shi *et al.*，2018）。谱图中的纵坐标是相对幂，值越大，特定沉积旋回出现的频率越高。选择99%置信度以上的频谱峰值，并选择性地使用90%和95%置信度之间的频谱峰值（Xue *et al.*，2022）。

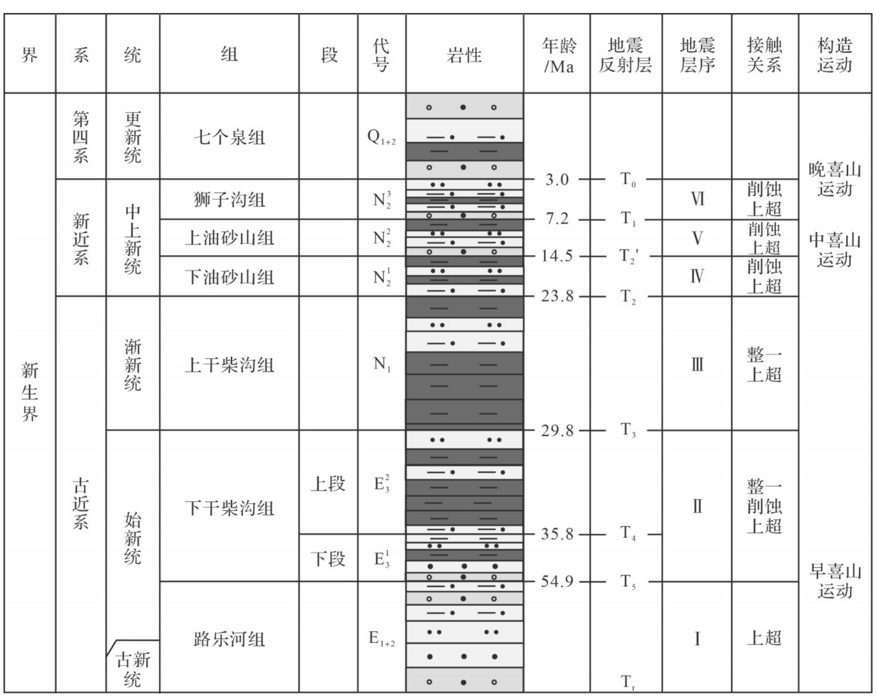

图2　柴达木盆地南八仙地区地层划分（潘家伟等，2015）

Fig.2　Stratigraphic division of the Nanbaxian area in the Qaidam Basin (Pan *et al.*, 2015)

在小波分析中使用了连续小波变换，小波谱中具有高功率和相对连续性的波长是主要地层旋回的厚度。小波分析是一种时频分析方法，可以将信号在时域和频域上进行局部化分析。它可以提取信号的局部特征，包括频率和能量的变化。小波分析被用于识别地层中的优势周期，并与米氏旋回的理论周期进行对比。通过小波分析，可以从测井数据中提取地层的时频特征信息，进一步确定地层中的旋回周期（付文钊等，2013；姜玥晗，2019；闾伟等，2023）。

采用数字滤波方法对预处理后的GR数据进行高斯带通滤波，得到不同时期的地层旋回。La2010d轨道周期的建立时间为14.5~23.8 Ma，是一个精确的天文目标（任宪军，2008；王宏波，2011；柯学等，2013）。技术路线图如图所示（图3）。

3 计算理论轨道周期

采用Laskar *et al*.（2004）所提供的计算方案，计算柴达木盆地下油砂山组沉积时期内的偏心率理论值、地轴斜率理论值、岁差变化理论值，以1.0 ka为采样间隔（图4a~c），对理论数据进行频谱分析，得到了柴达木盆地下油砂山组（14.5~23.8 Ma）的主要天文周期为400 ka、125 ka、95 ka、40 ka、23 ka、22 ka和19 ka。其中，400 ka（E_3）、125 ka（E_2）和95 ka（E_1）属于轨道偏心率周期。40 ka（T1）是斜率周期，23 ka（P3）、22 ka（P2）和19 ka（P1）是岁差周期（图4d~f）。本研究以这些理论轨道周期及其比值为基准。

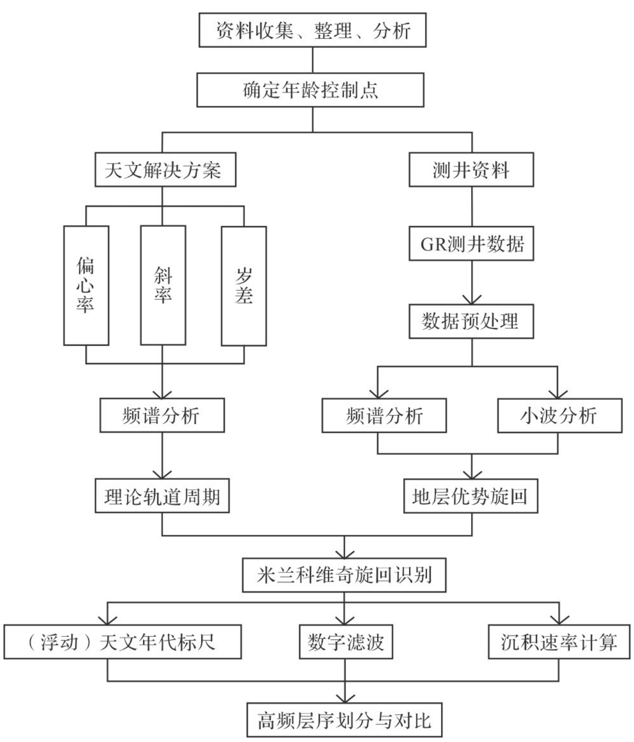

图3 研究技术路线图
Fig.3 Route of research technology

4 旋回地层分析

对GR测井数据进行预处理后，采用多窗口频谱分析和连续小波变换相结合的方法，获得地层优势旋回厚度。将它们的比值与理论轨道周期的比值对照来确定地层是否保存了米兰科维奇旋回，比值对照误差要小于5%（石巨业等，2017）。

4.1 频谱分析

对仙中39井下油砂山组的GR测井数据进行频谱分析（图5a）。选择99%或95%置信曲线以上的频率点，相应的频率值为0.026 770 83 m^{-1}、0.112 988 8 m^{-1}、0.265 532 m^{-1}和0.564 633 m^{-1}，转化为高频沉积旋回厚度分别为37.354 m、8.850 m、3.766 m和1.771 m。用同样的方法，得到仙中8-12井下油砂山组和仙中8-9井下油砂山组的主要旋回比例关系（表1、图5b，c）。

通过计算得到了天文周期和地层的基本数据。仙中39井下油砂山组各周期的厚度比为21.092∶4.997∶2.126∶1，相应天文周期的比值为21.053∶5∶2.105∶1，误差分别为3.9%、0.3%、2.1%和0（表1）。从三口井的分析数据来看，理论比值和厚度比值相近，误差均小于5%，证实该地层中存在米氏旋回。天文周期与周期厚度的比值如表1所示。

4.2 小波分析

对研究区内三口井的原始自然伽马测井信号进行归一化、去噪后，采用小波变换模极值法对测井信号的主周期进行识别和提取。将提取的周期与米氏旋回的固有周期进行比较分析，确定研究区是否响应米氏旋回（Laskar *et al*.，2004；付文钊等，2013；Fang *et al*.，2017；常吟善等，2019；姜玥晗，2019；闾伟等，2023）。

以仙中39井为例，对预处理后的GR数据进行小波变换（图6a），得到小波能量图谱（图6b）。图中横坐标表示深度，纵坐标表示小波变换的尺度，即包含的采样点个数。对小波系数取绝对值并平均化得到模均值曲线。在模均值曲线中，可以找到4个模极值

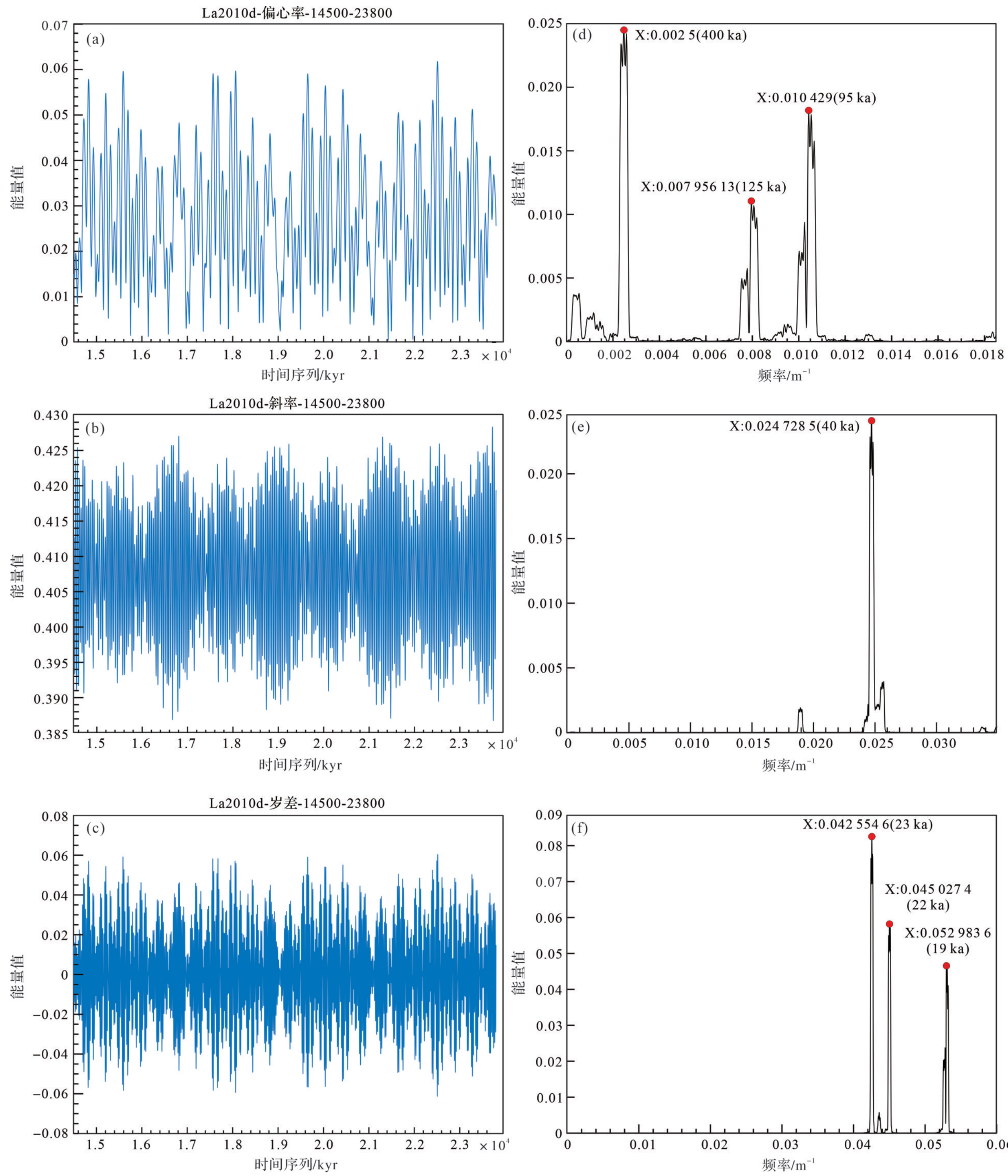

图4 14.5~23.8 Ma期间的偏心率、斜率和岁差的理论值曲线图和频谱分析图

(a)偏心率理论曲线图;(b)斜率理论曲线图;(c)岁差理论曲线图;(d)偏心率数据频谱分析图;(e)斜率数据频谱分析图;(f)岁差数据频谱分析图

Fig.4 Theoretical curves and spectral analysis of eccentricity, obliquity, and precession during 14.5-23.8 Ma

(a) theoretical curve of eccentricity; (b) theoretical curve of obliquity; (c) theoretical curve of precession; (d) spectral analysis of eccentricity data; (e) spectral analysis of obliquity data; (f) spectral analysis of precession data

点(12,25,58,243)。利用公式(1)计算主要旋回厚度。

$$\mathrm{Fa} = \mathrm{Fc}/a\Delta \quad (1)$$

式中:a代表尺度;Δ代表采样间隔(0.125 m);Fc为中心频率(0.812 5 Hz);Fa为准频率,即尺度对应的旋回厚度的倒数。

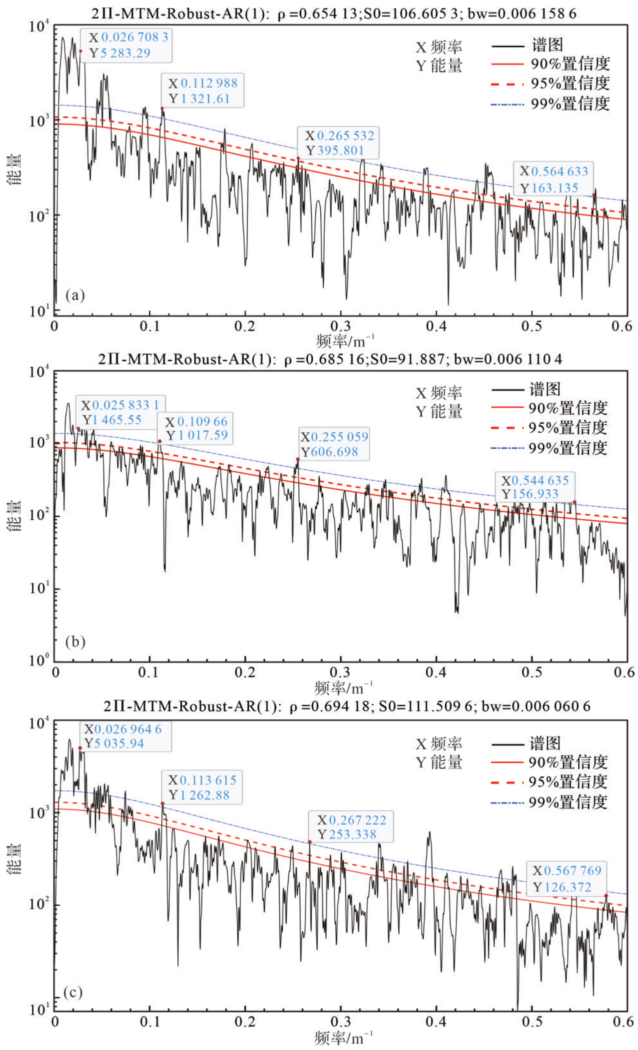

图5　柴达木盆地南八仙油气田下油砂山组频谱分析图

(a)仙中39井;(b)仙中8-12井;(c)仙中8-9井

Fig.5　Spectral analysis charts of the Xiayoushashan Formation in the Nanbaxian oil and gas field, Qaidam Basin

(a) well Xianzhong 39; (b) well Xianzhong 8-12; (c) well Xianzhong 8-9

通过计算,得出在仙中39井存在4个主要旋回厚度,分别为1.846 m、3.846 m、8.923 m、37.385 m。该结果与使用频谱测量旋回厚度所获得的结果基本一致。确定了37.354 m、8.850 m、3.766 m、1.771 m分别为长偏心率、短偏心率、斜率、岁差所控制的主要旋回层厚度。

4.3　沉积速率计算

对仙中39井下油砂山组的分析表明,400 ka的长偏心率周期对应于天文周期中113.55 m的周期厚度,其相应的沉积速率可计算为0.093 39 m/ka。为了使沉积速率的数据尽可能准确,本文计算了短偏心率周期95 ka、斜率周期40 ka和岁差周期19 ka。然后计算出相应的沉积速率分别为0.093 16 m/ka、0.094 1 m/ka和0.093 2 m/ka(表2)。根据轨道周期计算出下油砂山组的平均沉积速率为0.093 48 m/ka。同样,对仙中8-9井和仙中8-12井进行了分析,沉积速率如表2所示。前人研究表明(王倩倩等,2024),柴达木盆地下油砂山组沉积速率大致介于89.29~266.85 m/Ma,根据轨道周期计算出仙中39井、仙中8-9井和仙中8-12井的下油砂山组平均速率为0.094 41 m/ka。

4.4　"浮动"天文年代标尺

通过将GR测井曲线滤波后的沉积旋回与理论天文轨道周期一一对应,可将天文信号的深度经过天文调谐转换为精确的时间信号,从而得到高分辨率的天文年代标尺(吴怀春等,2011;Cao *et al.*,2016;徐伟等,2019)。根据识别出的米兰科维奇旋回的个数,结合基于磁性地层、生物地层以及锆石测年得出

表1　柴达木盆地南八仙油气田下油砂山组天文周期与周期厚度的比值

Table 1　Ratio of astronomical cycles to cyclothem thickness in the Xiayoushashan Formation of the Nanbaxian oil and gas field, Qaidam Basin

井名	频谱/m^{-1}	旋回厚度/m	比值	理论比值	误差率/%	轨道周期/ka
仙中39井	0.026 770 8	37.354	21.092	21.053	3.9	长偏心率400
	0.112 989	8.850	4.997	5	0.3	短偏心率95
	0.265 532	3.766	2.126	2.105	2.1	斜率40
	0.564 633	1.771	1	1	0	岁差19
仙中8-9井	0.026 964 6	37.086	21.060	21.053	0.66	长偏心率400
	0.113 615	8.802	4.998	5	0.17	短偏心率95
	0.267 222	3.742	2.125	2.105	2	斜率40
	0.567 769	1.761	1	1	0	岁差19
仙中8-12井	0.025 833 1	38.710	21.084	21.053	3.10	长偏心率400
	0.109 660	9.119	4.967	5	3.32	短偏心率95
	0.255 059	3.921	2.135	2.105	3.04	斜率40
	0.545 635	1.836	1	1	0	岁差19

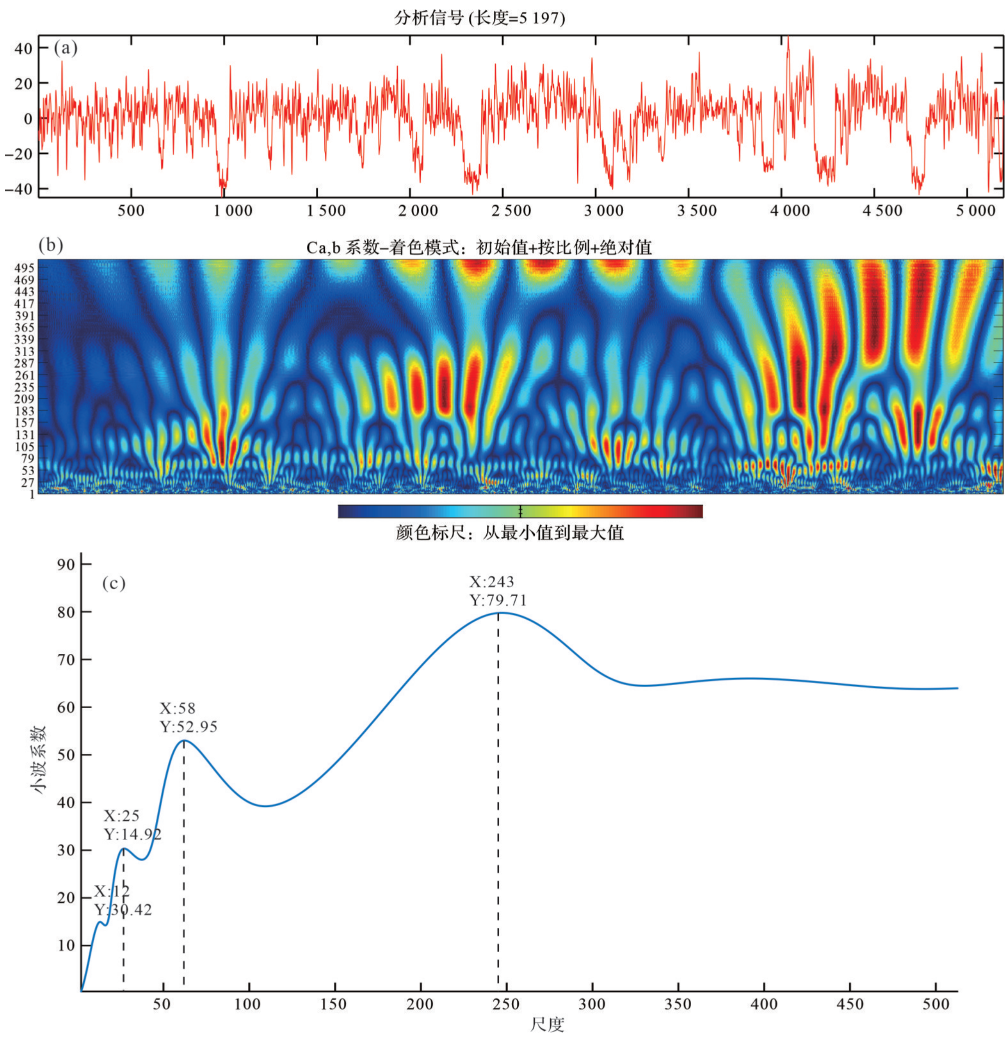

图6　仙中39井测井信号小波变换

(a)预处理之后仙中39井测井GR数据;(b)小波变换能量图谱;(c)小波变换模均值曲线

Fig.6　Wavelet transform of well logging signals in well Xianzhong 39

(a) gamma ray (GR) data after preprocessing; (b) wavelet transform energy spectrum; (c) wavelet transform modulus mean curve

表2 柴达木盆地南八仙油气田下油砂山组沉积速率

Table 2 Sedimentary Rate fro the Xiayoushashan Formation in Nanbaxian oil and gas field, Qaidam Basin

井号	轨道周期/ka	沉积速率/(m/ka)	平均沉积速率/(m/ka)
仙中39井	400/95/40/19	0.093 39/0.093 16/0.094 15/0.093 20	0.093 48
仙中8-9井	400/95/40/19	0.092 72/0.092 65/0.093 55/0.092 68	0.092 90
仙中8-12井	400/95/40/19	0.096 78/0.095 99/0.098 03/0.096 63	0.096 86

的精确时间"锚点",可建立"浮动"天文年代标尺(He *et al.*,2022;徐敬领等,2022)。

频谱分析及连续小波变换中表明仙中39井下油砂山组的沉积受地球轨道参数(偏心率、斜率和岁差)影响,而400 ka长偏心率E3信号相对更为稳定。因此,以400 ka长偏心率周期E3滤波曲线为主要调谐曲线、95 ka短偏心率周期E1曲线为参考曲线,长偏心率滤波参数是(0.026 677 083±0.005)旋回/m,短偏心率滤波参数为(0.112 988 8±0.005)旋回/m。以Laskar方案(Laskar *et al.*,2004)计算出的理论天文周期的偏心率为基准进行校对,使主要调谐曲线和理论天文周期曲线谷值位置对应一致,采用自下而上的直接计算旋回数法,建立"浮动"天文年代标尺。参照前人研究,下油砂山组底部界面磁性年龄为23.8 Ma(任宪军,2008;王宏波,2011;柯学等,2013)。以该底部年龄为基准,地层沉积记录中保留有偏心率周期长18个左右、偏心率周期短72个左右,同时每两调谐线间偏心率周期400 ka左右,历时约7.2 Ma,推算出下油砂山组顶界面年龄为16.6 Ma(图7)。天文年代标尺的建立对柴达木盆地下油砂山组的形成时限进行了约束,有助于实现柴达木盆地下油砂山组高精度地层对比,对其沉积过程的定量研究也具有重要意义。

5 高频沉积旋回识别与划分

选取仙中39井、仙中8-9井和仙中8-12井的GR数据进行频谱分析和小波分析,将获得的数据与天文周期进行比较,确定了相似的比例。这些比例分别对应于天文周期中400 ka、95 ka的天文轨道偏心率周期。分析结果表明,米兰科维奇理论可以应用于柴达木盆地下油砂山组,并为以下高频序列的划分和相关提供了可行的依据。周期划分的具体方案如表3所示。

天文周期分析可以建立周期与地层厚度之间的关系。因此,通过分析几个主要旋回周期,可以确定不同厚度尺度下的地层旋回特征,这也是确定地层旋回方案的参考依据。应用Milankovitch天文周期理论,可将柴达木盆地下油砂山组划分为16~17个理论四级周期和71~74个理论五级周期。在确定划分方案后,自然伽马曲线过滤出的400 ka长偏心率周期作为四级准层序组划分的标准,将95 ka短偏心率周期作为五级准层序划分标准,再结合测井曲线和岩性数据的形态特征,在研究区域内以仙中39井、仙中8-9井和仙中8-12井为高频分析实例,在下油砂山组识别出了17个四级准层序组,72个五级准层序(图8)。每四级准层序组的持续时间约为400 ka,每五级准层序的连续时间约为95 ka。

6 结论

(1) 利用Laskar算法计算出北纬35°夏至日14.5~23.8 Ma期间地球轨道参数变化周期,确定该沉积时期理论米氏旋回周期比值21.053∶5∶2.105∶1。

(2) 新近系下油砂山组主要受400 ka和95 ka偏心周期控制。根据轨道周期计算出的这三口井的下油砂山组平均速率为0.094 41 m/ka。

(3) 建立了仙中39井的"浮动"天文年代标尺,计算出下油砂山组沉积持续时间为7.2 Ma。将400 ka长偏心率周期曲线和95 ka短偏心率周期曲线作为研究区四级准层序组、五级准层序划分的参考曲线,对南八仙地区下油砂山组地层进行高频旋回地层划分,共识别出18个四级准层序组和72个五级准层序。

致谢 感谢两位审稿专家、编辑部老师及张兆辉老师的宝贵意见与指导。

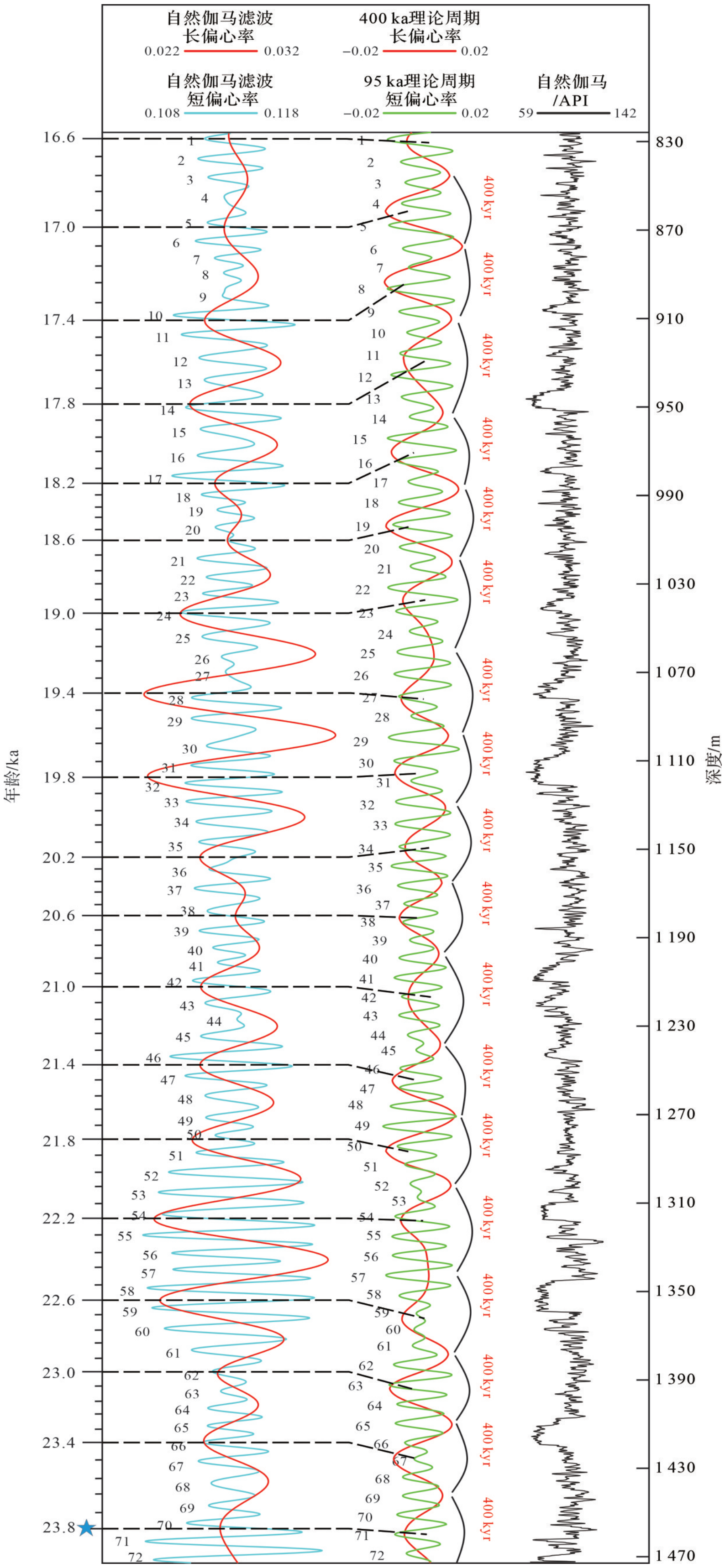

图7　仙中39井天文年代标尺

Fig.7　Astronomical chronostratigraphy of well Xianzhong 39

表3 各个井周期划分方案

Table 3 Cyclostratigraphic division scheme for each well

井名称	地层厚度/m	轨道周期/ka	主旋回厚度/m	四级旋回	五级旋回
仙中39井	649.49	400/95	37.354/8.850	17.4	73.4
仙中8-9井	654.59	400/95	37.086/8.802	17.4	74.4
仙中8-12井	654.67	400/95	38.710/9.119	16.9	71.8

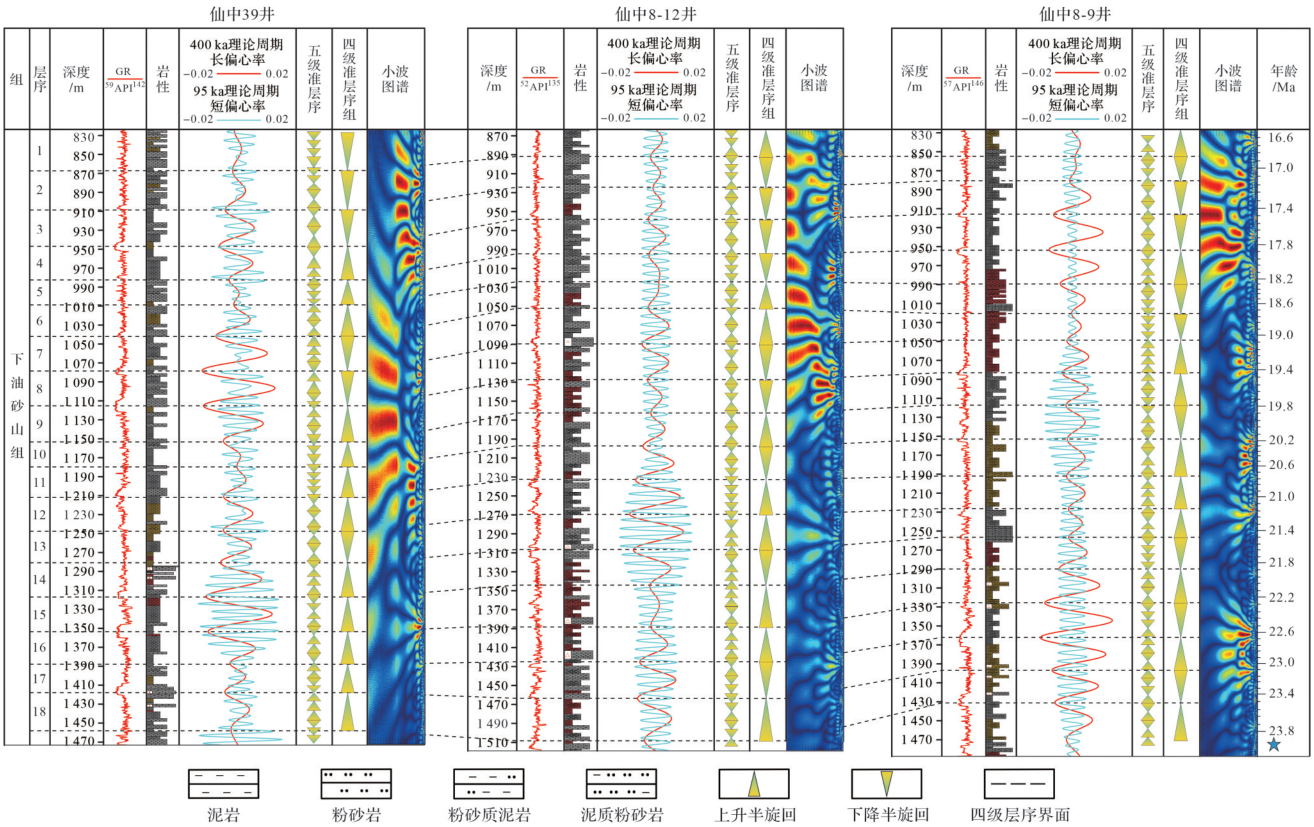

图8 柴达木盆地南八仙油气田下油砂山组高频旋回识别与划分

Fig.8 Identification and division of high frequency cycles in the Xiayoushashan Formation of the Nanbaxian oil and gas field, Qaidam Basin

参考文献(References)

常吟善,覃军,赵洪,等. 2019. 基于米氏旋回理论的高频层序识别与划分:以东海陆架盆地平湖斜坡带宝云亭地区平三段为例[J]. 海洋地质与第四纪地质,39(3):51-60. [Chang Yinshan, Qin Jun, Zhao Hong, et al. 2019. Identification and division of high-frequency sequence based on Milakovitch cycle: A case of the 3rd member of Pinghu Formation in Baoyunting area, Pinghu slope zone, East China Sea Shelf Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 39(3): 51-60.]

陈秋实. 2014. 柴达木盆地西部地区构造演化及圈闭特征研究[D]. 成都:西南石油大学. [Chen Qiushi. 2014. Research on the tectonic evolution and trap characteristics of the western region of the Qaidam Basin[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University.]

陈文萍,胡望水,李涛,等. 2020. 柴达木盆地新生代走滑构造特征及成因演化[J]. 科学技术与工程,20(2):497-504. [Chen Wenping, Hu Wangshui, Li Tao, et al. 2020. The characteristics and genetic evolution of the Cenozoic strike-slip structure in Qaidam Basin[J]. Science Technology and Engineering, 20(2): 497-504.]

陈云,唐闻强,张承志,等. 2021. 基于自然伽马测井曲线的旋回识别及古气候判断[J]. 测井技术,45(4):416-423. [Chen Yun, Tang Wenqiang, Zhang Chengzhi, et al. 2021. Study on paleoclimate and dentification of high frequency cycle based on natural gamma ray logging data[J]. Well Logging Technology, 45(4): 416-423.]

陈兆芹,刘景彦,杨宪章,等. 2023. 塔里木盆地英买力地区三叠系相对湖平面变化分析[J]. 西北地质,56(1):203-216. [Chen Zhaoqin, Liu Jingyan, Yang Xianzhang, et al. 2023. Discussion on relative lacustrine level changes of Triassic in Yingmaili area, Tarim Basin[J]. Northwestern Geology, 56(1): 203-216.]

程日辉,王国栋,王璞珺. 2008. 松辽盆地白垩系泉三段—嫩二段沉积旋回与米兰科维奇周期[J]. 地质学报,82(1):55-64. [Cheng Rihui, Wang Guodong, Wang Pujun. 2008. Sedimentary cycles of the Cretaceous Quantou—Nenjiang Formations and Milankovitch cycles of the south hole of the SLCORE-I in the Songliao Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 82(1): 55-64.]

冯路尧,张建国,姜在兴,等. 2023. 松辽盆地青山口组高精度沉积旋回格架及有机质富集响应[J]. 石油学报,44(2):299-311.[Feng Luyao, Zhang Jianguo, Jiang Zaixing, et al. 2023. High-precision sedimentary cycle framework and organic matter enrichment response of Qingshankou Formation in Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 44(2): 299-311.]

付锁堂,张道伟,薛建勤,等. 2013. 柴达木盆地致密油形成的地质条件及勘探潜力分析[J]. 沉积学报,31(4):672-682.[Fu Suotang, Zhang Daowei, Xue Jianqin, et al. 2013. Exploration potential and geological conditions of tight oil in the Qaidam Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 31(4): 672-682.]

付文钊,余继峰,杨锋杰,等. 2013. 测井记录中米氏旋回信息提取及其沉积学意义:以济阳坳陷区为例[J]. 中国矿业大学学报,42(6):1025-1032.[Fu Wenzhao, Yu Jifeng, Yang Fengjie, et al. 2013. Feature extraction of Milankovitch cycle in well logs and its sedimentological significance: A case study of Jiyang Depression zone[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 42(6): 1025-1032.]

黄璞,熊亮,詹国卫,等. 2025. 基于米兰科维奇理论页岩岩相组合研究:以四川盆地南部龙马溪组一段为例[J]. 沉积学报,43(4):1461-1474.[Huang Pu, Xiong Liang, Zhan Guowei, et al. 2025. Research on shale facies combination based on Milankovitch theory: Taking the First member of Longmaxi Formation in the southern Sichuan Basin as an example[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 43(4): 1461-1474.]

贾东力,田景春,林小兵,等. 2018. 塔里木盆地顺托果勒地区志留系柯坪塔格组米兰科维奇旋回沉积记录[J]. 石油与天然气地质,39(4):749-758.[Jia Dongli, Tian Jingchun, Lin Xiaobing, et al. 2018. Milankovitch cycles in the Silurian Kepingtage Formation in Shuntuoguole area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 39(4): 749-758.]

姜玥晗. 2019. 滇黔北地区五峰组—龙马溪组下段米兰科维奇旋回研究[D]. 成都:西南石油大学.[Jiang Yuehan. 2019. Research on the Milankovitch cycles in the lower section of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the northern Yunnan-Guizhou region[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University.]

金之钧,李京昌,刘国臣. 1997. 米兰科维奇旋回识别问题[J]. 地学前缘,4(3/4):22.[Jin Zhijun, Li Jingchang, Liu Guochen. 1997. Issues in identifying Milankovitch cycles[J]. Earth Science Frontiers, 4(3/4): 22.]

柯学,季军良,宋博文,等. 2013. 柴达木盆地大红沟新生代地层剖面磁化率及其环境意义[J]. 地质学报,87(增刊1):251-254.[Ke Xue, Ji Junliang, Song Bowen, et al. 2013. Magnetic susceptibility of the Cenozoic strata profile in the Dahonggou area of the Qaidam Basin and its environmental significance[J]. Acta Geologica Sinica, 87(Suppl. 1): 251-254.]

闾伟,董艳蕾,葛家旺,等. 2023. 基于频谱属性趋势分析和小波变换的层序界面识别方法——以珠三坳陷中新统珠江组—韩江组为例[J]. 断块油气田,30(3):448-457.[Lü Wei, Dong Yanlei, Ge Jiawang, et al. 2023. Identification method of sequence boundary based on INPEFA and wavelet transform: A case study of Miocene Zhujiang to Hanjiang Formation in Zhu-3 Depression[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 30(3): 448-457.]

马达德,袁莉,陈琰,等. 2018. 柴达木盆地北缘天然气地质条件、资源潜力及勘探方向[J]. 天然气地球科学,29(10):1486-1496.[Ma Dade, Yuan Li, Chen Yan, et al. 2018. Geological conditions of natural gas, resource potential and exploration direction in the northern margin of Qaidam Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 29(10): 1486-1496.]

潘家伟,李海兵,孙知明,等. 2015. 阿尔金断裂带新生代活动在柴达木盆地中的响应[J]. 岩石学报,31(12):3701-3712.[Pan Jiawei, Li Haibing, Sun Zhiming, et al. 2015. Tectonic responses in the Qaidam Basin induced by Cenozoic activities of the Altyn Tagh fault[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(12): 3701-3712.]

彭军,于乐丹,许天宇,等. 2022. 湖相泥页岩地层米氏旋回测井识别及环境响应特征:以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷樊页1井Es^{4scs}为例[J]. 石油与天然气地质,43(4):957-969.[Peng Jun, Yu Ledan, Xu Tianyu, et al. 2022. Logging identification of Milankovitch cycle and environmental response characteristics of lacustrine shale: A case study on Es^{4scs} in well Fanye 1, Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 43(4): 957-969.]

任传真,褚润健,吴怀春,等. 2019. 天津蓟县剖面前寒武系洪水庄组—铁岭组米兰科维奇旋回[J]. 现代地质,33(5):979-989.[Ren Chuanzhen, Chu Runjian, Wu Huaichun, et al. 2019. Milankovitch cycles of the Precambrian Hongshuizhuang-Tieling Formations at Jixian section in Tianjin[J]. Geoscience, 33(5): 979-989.]

任宪军. 2008. 柴达木盆地北缘中新生代含油气性研究[D]. 大庆:大庆石油学院.[Ren Xianjun. 2008. The study on the petroleum properties in northern margin of Qaidam Basin[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute.]

石巨业,金之钧,刘全有,等. 2017. 米兰科维奇理论的高精度旋回识别与划分:以南图尔盖盆地Ary301井中侏罗统为例[J]. 沉积学报,35(3):436-448.[Shi Juye, Jin Zhijun, Liu Quanyou, et al. 2017. Recognition and division of high-resolution sequences based on the Milankovitch theory: A case study from the Middle Jurassic of well Ary301 in the South Turgay Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 35(3): 436-448.]

宋翠玉,吕大炜. 2022. 米兰科维奇旋回时间序列分析法研究进展[J]. 沉积学报,40(2):380-395.[Song Cuiyu, Lü Dawei. 2022. Advances in time series analysis methods for Milankovitch cycles[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 40(2): 380-395.]

宋明水,李存磊,张金亮. 2012. 东营凹陷盐家地区砂砾岩体沉积期次精细划分与对比[J]. 石油学报,33(5):781-789.[Song Mingshui, Li Cunlei, Zhang Jinliang. 2012. Fine division and correlation of conglomerate sedimentary cycles in Yanjia area of

Dongying Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 33(5): 781-789.]

宋世骏. 2022. 柴达木盆地新生代咸化湖盆细粒岩差异性发育机理及其地质意义[D]. 西安：西北大学.［Song Shijun. 2022. Different developing mechanism of fine-grained sediments in Cenozoic saline lakes in the Qaidam Basin and its geological implications [D]. Xi'an: Northwest University. ］

汤济广. 2007. 柴达木北缘西段中、新生代多旋回叠加改造型盆地构造演化及对油气成藏的控制作用[D]. 武汉：中国地质大学.［Tang Jiguang. 2007. Tectonic evolution and its control for hydrocarbon accumulation of Mesozoic-Cenozoic multicycle superimposed reformation basin in the west of northern Qaidam Basin [D]. Wuhan: China University of Geosciences. ］

唐闻强，伊海生，陈云，等. 2021. 基于测井曲线频谱分析米氏旋回特征：以柴西尕斯地区上干柴沟组为例[J]. 科学技术与工程，21（11）：4360-4368.［Tang Wenqiang, Yi Haisheng, Chen Yun, et al. 2021. Characteristics of Mirankovich cycles based on the spectrum analysis of logging curve: A case study of Shangganchaigou Formation in gas area, western Qaidam Basin[J]. Science Technology and Engineering, 21(11): 4360-4368. ］

王渤，石巨业，朱如凯，等. 2025. 天文周期驱动下湖相细粒沉积岩有机质富集模式——以东营凹陷LY1井沙三下—沙四上亚段为例[J]. 沉积学报，43（2）：750-768.［Wang Bo, Shi Juye, Zhu Rukai, et al. 2025. Organic matter enrichment model of lacustrine fine-grained sedimentary rocks driven by astronomical cycles: A case study of the lower Es_3 and upper Es_4 sub-member in well LY1, Dongying Sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2025, 43(2): 750-768. ］

王宏波. 2011. 柴达木盆地北缘冲断带第三系沉积特征与岩性油气藏预测[D]. 成都：成都理工大学.［Wang Hongbo. 2011. Tertiary sedimentary characteristic and lithologic reservoir prediction in thrust belt, north Qaidam Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. ］

王倩倩，袁四化，王亚东，等. 2024. 柴达木盆地西部地区新生代盆地性质[J]. 吉林大学学报（地球科学版），54（1）：160-181.［Wang Qianqian, Yuan Sihua, Wang Yadong, et al. 2024. The nature of the Cenozoic western Qaidam Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 54(1): 160-181. ］

魏小松，陆江，刘蕾，等. 2018. 涠西南凹陷流沙港组一段天文旋回识别及高频层序划分[J]. 中国海上油气，30（6）：99-108.［Wei Xiaosong, Lu Jiang, Liu Lei, et al. 2018. Astronomical cycle identification and high frequency sequence division of the 1st member of Liushagang Formation in Weixinan Sag, Beibuwan Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 30(6): 99-108. ］

吴怀春，张世红，冯庆来，等. 2011. 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，36（3）：409-428.［Wu Huaichun, Zhang Shihong, Feng Qinglai, et al. 2011. Theoretical basis, research advancement and prospects of cyclostratigraphy[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 36(3): 409-428. ］

吴怀春，张世红，黄清华. 2008. 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，15（4）：159-169.［Wu Huaichun, Zhang Shihong, Huang Qinghua. 2008. Establishment of floating astronomical time scale for the terrestrial Late Cretaceous Qingshankou Formation in the Songliao Basin of Northeast China[J]. Earth Science Frontiers, 15(4): 159-169. ］

吴文雯. 2020. 柴北缘西段冷湖七号构造古近系岩性分布地震预测[D]. 北京：中国石油大学（北京）.［Wu Wenwen. 2020. Lithologic prediction of Paleogene in Lenghu No. 7 tectonic structure, the western part of northern Qaidam Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing). ］

颉永琛，关平，杨国军，等. 2012. 南八仙油气田成藏机理再认识[J]. 天然气地球科学，23（5）：876-883.［Xie Yongchen, Guan Ping, Yang Guojun, et al. 2012. Reanalysis of reservoir accumulation mechanism in Nanbaxian oil-gas field[J]. Natural Gas Geoscience, 23(5): 876-883. ］

徐敬领，霍家庆，宋连腾，等. 2022. 基于测井数据的米氏旋回分析及浮动天文年代标尺的建立[J]. 地球物理学报，65（7）：2766-2778.［Xu Jingling, Huo Jiaqing, Song Lianteng, et al. 2022. Analysis of Milankovitch cycles and establishment of floating astronomical date scale based on well-logging data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 65(7): 2766-2778. ］

徐伟，房磊，张新叶，等. 2019. 乌干达K油田扇三角洲沉积正演模拟与应用[J]. 地球科学，44（2）：513-523.［Xu Wei, Fang Lei, Zhang Xinye, et al. 2019. Sedimentary forward simulation and application of fan delta in K oil field in Uganda[J]. Earth Science, 44(2): 513-523. ］

徐为鹏，伊海生，唐闻强，等. 2023. 柴西开特米里克地区干柴沟组米氏旋回及湖平面变化特征[J]. 沉积与特提斯地质，43（4）：712-721.［Xu Weipeng, Yi Haisheng, Tang Wenqiang, et al. 2023. Characteristics of the Milankovitch cycles and lake-level changes in the Ganchaigou Formation of the Kaitemirike area, western Qaidam[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(4): 712-721. ］

杨国军，王国芝，吴强，等. 2015. 柴达木盆地南八仙油气田构造及演化特征[J]. 重庆科技学院学报（自然科学版），17（2）：15-18，33.［Yang Guojun, Wang Guozhi, Wu Qiang, et al. 2015. The structure and evolution characteristics of Nanbaxian oil and gas field in Qaidam Basin[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 17(2): 15-18, 33. ］

张振铎，姚宗全，穆波宇，等. 2023. 坝上河—滩坝微相组合特征——以柴北缘南八仙油气田新近系下油砂山组为例[J]. 中国科技论文，18（9）：942-955.［Zhang Zhenduo, Yao Zongquan, Mu Boyu, et al. 2023. Characteristics of upper distributary bar and beach-bar microfacies assemblages: A case study of Neogene Xiayoushashan Formation in Nanbaxian oil and gas field on northern margin of Qaidam Basin[J]. China Sciencepaper, 18(9): 942-955. ］

赵军，曹强，付宪弟，等. 2018. 基于米兰科维奇天文旋回恢复地层剥蚀厚度：以松辽盆地X油田青山口组为例[J]. 石油实验地质，40（2）：260-267.［Zhao Jun, Cao Qiang, Fu Xiandi, et al. 2018. Recovery of denuded strata thickness based on Milankovitch astronomical cycles: A case study of Qingshankou Formation in X oilfield, Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 40(2): 260-267.]

Cao H Y, Jin S D, Sun M, et al. 2016. Astronomical forcing of sedimentary cycles of Late Eocene Liushagang Formation in the Bailian Sag, Fushan Depression, Beibuwan Basin, South China Sea[J]. Journal of Central South University, 23(6): 1427-1438.

Falahatkhah O, Kordi M, Fatemi V, et al. 2021. Recognition of Milankovitch cycles during the Oligocene-Early Miocene in the Zagros Basin, SW Iran: Implications for Paleoclimate and sequence stratigraphy[J]. Sedimentary Geology, 421: 105957.

Fang Q, Wu H C, Hinnov L A, et al. 2017. Astronomical cycles of Middle Permian Maokou Formation in South China and their implications for sequence stratigraphy and paleoclimate[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 474: 130-139.

Guo G, Tong J N, Zhang S H, et al. 2008. Cyclostratigraphy of the Induan (Early Triassic) in West Pingdingshan section, Chaohu, Anhui province[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 51(1): 22-29.

He P, Zhang S F, Xu E Z, et al. 2022. Milankovitch cycles and the astronomical time scale of the Zhujiang Formation in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, China[J]. Open Geosciences, 14(1): 1380-1392.

Huang C J, Tong J N, Hinnov L, et al. 2011. Did the great dying of life take 700 k. y. ? Evidence from global astronomical correlation of the Permian-Triassic boundary interval[J]. Geology, 39(8): 779-782.

Laskar J, Robutel P, Joutel F, et al. 2004. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the earth[J]. Astronomy & Astrophysics, 428(1): 261-285.

Li M S, Hinnov L, Kump L. 2019. *Acycle*: Time-series analysis software for paleoclimate research and education[J]. Computers & Geosciences, 127: 12-22.

Shi J Y, Jin Z J, Liu Q Y, et al. 2018. Terrestrial sedimentary responses to astronomically forced climate changes during the Early Paleogene in the Bohai Bay Basin, eastern China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 502: 1-12.

Wei X S, Deng Y, Yan D T, et al. 2023. Organic matter enrichment in Asia's Palaeolake controlled by the Early and Middle Eocene global warming and astronomically driven precessional climate[J]. Marine and Petroleum Geology, 154: 106342.

Wu H C, Zhang S H, Jiang G Q, et al. 2009. The floating astronomical time scale for the terrestrial Late Cretaceous Qingshankou Formation from the Songliao Basin of Northeast China and its stratigraphic and paleoclimate implications[J]. Earth and Planetary Science Letters, 278(3/4): 308-323.

Xue Z Y, Chen P P, Li C L, et al. 2022. High frequency sequence stratigraphy analysis for Dawangbei subsag based on the spectrum analysis of the logging curve[J]. Arabian Journal of Geosciences, 15(11): 1047.

Zhang R, Li L, Nai W H, et al. 2019. Astronomical forcing of terrestrial climate recorded in the Pleistocene of the western Tarim Basin, NW China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 530: 78-89.

Identification and Division of the High-Frequency Sequence Based on Milakovitch Cycles: A case study of Xiayoushashan Formation in the Nanbaxian oil and gas field

REYIZHA Shayireatehan[1,2], YAO ZongQuan[1,2], LI JiYong[3], ZHANG YuanZhi[4], ZHENG Bin[5], ZHANG ShiChao[5], LIU ShaoPeng[5], MA YuanKun[3]

1. College of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830000, China

2. Xinjiang Key Laboratory of Central Asia Geological and Mineral Information Integration, Urumqi 830000, China

3. Research Institute of Exploration and Development, Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Dunhuang, Gansu 736200, China

4. Beijing Yuanbo Technology Co. , Ltd, Beijing 102200, China

5. PetroChina Qinghai Oilfield Gas Production Plant No. 2, Dunhuang, Gansu 736200, China

Abstract: [**Objective**] By analyzing the influence of the periodic change of earth orbit on the periodic change of climate, this study examined the climate change characteristics of the Xiayoushashan Formation in Qaidam Basin and established its high-resolution astronomical scale based on Milankovitch theory to identify and divide high-frequency sequences. [**Methods**] First, the Laskar algorithm was used to calculate the variation period of the orbital parameters of Earth during the summer solstice at 35°N from 14.5-23.8 Ma, and the Miocene cycle theory and ratio in this sedimentary period were determined. Then, taking wells Xianzhong 39, Xianzhong 8-9 and Xianzhong 8-12 in the Nanbaxian oil and gas field as examples, the natural gamma data were analyzed by their frequency spectrum and continuous wavelet transform. Finally, based on the orbital period, the average sedimentation rate of the Xiayoushashan Formation was calculated, and the "floating" astronomical scale of well Xianzhong 39 was established. [**Results**] Through the analysis of frequency spectrum and continuous wavelet transform, the Neogene Xiayoushashan Formation was shown to be mainly controlled by eccentricity periods of 400 and 95 ka. The average sedimentation rate of the Xiayoushashan Formation was 0.094 41 m/ka, and the sedimentation duration was 7.2 Ma. Based on the 400 ka long and 95 ka short eccentric period curves as benchmark curves, 18 fourth-order quasi-sequence groups and 72 fifth-order quasi-sequence groups were identified. [**Conclusions**] The results show that the climate change recorded in the Xiayoushashan Formation is controlled and driven by cycles. Identification and division based on Milankovitch theory can reduce the influence of subjective factors, improve the accuracy of division results, and more accurately describe the climate change characteristics in sediments. These research results are helpful for deeply understanding the evolution law of the Warth's climate and providing important reference for oil and gas exploration and resource evaluation.

Key words: Milankovitch cycle; spectrum analysis; wavelet analysis; high-frequency sequence; Nanbaxian; Qaidam Basin

Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41902109; Open Fund for Gansu Provincial Key Laboratory of Oil and Gas Resources Research, No. SZDKFJJ2023007; Xinjiang Uygur Autonomous Region "Tianchi Talent" Program Fund, No. 51052300560

Corresponding author: YAO ZongQuan, E-mail: yzq@xju.edu.cn