



移动阅读

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. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.04005

XU W P, YI H S, TANG W Q, 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. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.04005

## 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

徐为鹏<sup>1,2</sup>, 伊海生<sup>1,2\*</sup>, 唐闻强<sup>1,2,3</sup>, 陈云<sup>1,2</sup>, 陈晓冬<sup>3</sup>, 邢浩婷<sup>3</sup>, 宋伟<sup>3</sup>,  
崔荣龙<sup>3</sup>, 乔富海<sup>3</sup>

(1. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059; 3. 中国石油青海油田分公司, 甘肃 敦煌 736202)

**摘要:** 目前, 柴达木盆地米兰科维奇旋回研究普遍基于山前浅水沉积相地层进行讨论, 而深水相地层中是否有记录米兰科维奇旋回特征有待探讨。本次研究通过对开 2 井上干柴沟组 ( $N_1$ ) 和下干柴沟组上段 ( $E_3^2$ ) 自然伽马测井曲线进行频谱分析和滤波分析, 探讨了盆地西部开特米里克地区深湖相地层的米兰科维奇沉积旋回特征。结果显示, 该地区上干柴沟组 ( $N_1$ ) 和下干柴沟组 ( $E_3^2$ ) 地层旋回周期与米兰科维奇地球轨道周期参数具有良好的对应性, 说明天文轨道周期旋回对该地区地层沉积具有显著影响。在此基础上, 结合 Fischer 图解及地层岩性特征, 确定了干柴沟组上、下界线附近 (约 38.1~32.8 Ma) 湖平面经历了一次相对长周期的升降变化。下干柴沟组上段处于湖平面上升阶段, 主要受米氏旋回中的偏心率周期控制, 气候相对温暖湿润, 对应湖平面高位期。上干柴沟组处于湖平面下降阶段, 主要受米氏旋回中的轴斜率周期控制, 气候相对寒冷干旱, 对应湖平面低位期。

**关键词:** 柴达木盆地; 自然伽马; 米氏旋回; Fischer 图解; 湖平面

中图分类号: P539.2

文献标识码: A

### Characteristics of the Milankovitch cycles and lake-level changes in the Ganchaigou Formation of the Kaitemirike area, western Qaidam.

XU Weipeng<sup>1,2</sup>, YI Haisheng<sup>1,2\*</sup>, TANG Wenqiang<sup>1,2,3</sup>, CHEN Yun<sup>1,2</sup>, CHEN Xiaodong<sup>3</sup>,  
XING Haoting<sup>3</sup>, SONG Wei<sup>3</sup>, CUI Ronglong<sup>3</sup>, QIAO Fuhai<sup>3</sup>

(1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu 610059, China; 3. Qinghai oilfield Company, Petro China, Dunhuang 736202, China)

**Abstract:** At present, the research on Milankovitch cycles in the Qaidam Basin is generally based on the discussion of the shallow-water sedimentary facies strata in the piedmont, but it remains to be explored whether the Milankovitch cycle characteristics are recorded in the deep-water facies strata. In this study, the Milankovitch sedimentary cycles of deep lacustrine strata in the Kaitemirike area in the west of the basin have been discussed through spectral analyses and filter analyses of natural gamma logging curves of the upper Ganchaigou Formation ( $N_1$ ) and the upper part of lower Ganchaigou Formation ( $E_3^2$ ) in Well K2. The results show that the

收稿日期: 2021-03-31; 改回日期: 2021-04-22; 责任编辑: 郭秀梅

作者简介: 徐为鹏 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为沉积地质。E-mail: 857886628@qq.com

通讯作者: 伊海生 (1959—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为沉积学。E-mail: yhs@cdu.edu.cn

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41972115); 中国石油科技部重大专项 (2019B-0309)

stratigraphic cycles of the upper Ganchaigou Formation ( $N_1$ ) and the upper part of lower Ganchaigou Formation ( $E_3^2$ ) in this area have a good correlation with the earth's orbital cycle parameters of Milankovitch, indicating that the astronomical orbital cycle had a significant effect on the stratigraphic deposition in this area. On this basis, the Fischer plot and the sedimentary characteristics of the strata indicate that the lake level near the upper and lower boundary of Ganchaigou Formation (~38.1-32.8 Ma) experienced a relatively long period of fluctuation. The upper part of lower Ganchaigou Formation was formed in the rising stage of the lake level, which was mainly controlled by the eccentricity cycle in the Milankovitch cycle, and the climate was relatively warm and humid, corresponding to the high stage of lake level. The upper Ganchaigou Formation was deposited in the falling stage of the lake level, which was mainly controlled by the axial slope cycle in the Milankovitch cycle, and the climate was relatively cold and dry, corresponding to the low stage of lake level.

**Key words:** Qaidam Basin; natural gamma; Milankovitch cycle; Fischer plot; lake level

## 0 引言

自新生代以来,柴达木盆地连续巨厚的地层为米兰科维奇旋回研究提供了良好的材料,先后有人在柴西南七个泉地区油砂山组、扎哈南地区下干柴沟组、尕斯地区上干柴沟组等地层中发现米兰科维奇旋回特征的存在(李堃宇等, 2018; 唐闻强等, 2020),但早期研究对象基本上是山前浅水沉积相地层,深水相地层常因缺乏好的地表露头剖面而被讨论较少。柴达木盆地西部开特米里克地区钻井深度较浅,主要集中在狮子沟组( $N_2^3$ )、上油砂山组( $N_2^2$ )、下油砂山组( $N_2^1$ )等浅部地层(李军等, 2019)。近些年来,随着勘探力度的不断加大,该地区部署了开2井等深部钻探井,从而获取了一系列深井钻探的高分辨率测井资料。其中,干柴沟组就发育一个可供进行米兰科维奇旋回特征研究的完整深水相沉积序列。该地层为深水相泥岩与灰岩旋回,有别于山前浅水相砂泥岩旋回,补充了柴达木盆地深水沉积米兰科维奇旋回周期记录,同时也在一定程度上减弱了造山带构造活动对山前沉积地层的影响。

上个世纪40年代,米兰科维奇在前人工作的基础上提出米兰科维奇旋回理论(Milankovitch, 1941; Berger et al., 1989)。该理论指出各地区日照量的周期变化主要受地球轨道三要素控制,即偏心率、轴斜率和岁差。日照量的周期性变化控制着全球气候变化,气候的变化直接导致沉积环境的改变,而这些变化的信息也被记录在了沉积地层中(Idnurm and Cook, 1980; Paul and Dennis, 1999; Weedon, 2003)。因此,本文以柴达木盆地开特米里克地区干柴沟组为研究对象,基于自然伽马测井曲线,运用频谱分析与滤波分析的方法,并结合Fischer图解,探讨该时期的湖平面变化情况以及

地层中高频沉积旋回的控制因素。

## 1 区域地质概况

柴达木盆地位于亚洲腹地,是我国重要的含油气盆地之一。该盆地总体呈北西西—南东方向延伸,其西北、东北和南面分别为阿尔金山、祁连山和昆仑山,是一个典型的陆相沉积盆地(王艳清, 2014)。其中的开特米里克油田位于柴达木盆地西部坳陷区茫崖坳陷亚区,属于油泉子背斜带上的一个三级构造(图1)。新生代古近系以来,盆地长期稳定下降,连续沉积了新生代古近系和新近系地层(郑希民等, 2019)。在渐新世末由于差异升降作用,形成了一系列的构造雏形,中新世早期由于水平挤压作用形成目前的构造形态。开2井位于该构造高部位,钻遇的地层由新到老依次有狮子沟组( $N_2^3$ )(未见顶)、上油砂山组( $N_2^2$ )、下油砂山组( $N_2^1$ )、上干柴沟组( $N_1$ )、下干柴沟组上段( $E_3^2$ )(未见底)五套地层,地层层序正常,其中本次用于研究的上干柴沟组( $N_1$ )与下干柴沟组上段( $E_3^2$ )是典型的深水湖相沉积(汤良杰等, 2000; 周斌等, 2013; 付国民, 2001)。上干柴沟组( $N_1$ )岩性主要以灰色、深灰色泥岩、砂质泥岩、泥灰岩为主,地层厚度为912 m,古地磁地层年代为35.5~26.5 Ma(张伟林, 2006)。下干柴沟组上段( $E_3^2$ )岩性以深灰色泥岩、砂质泥岩为主,夹少量泥灰岩,未见底界。地层总体发育完整,未见缺失,是理想的研究对象。

## 2 数据及方法

### 2.1 数据选择

米氏旋回研究中数据的选择具有多样性。在地层中符合采样密度的地球物理数据或地球化学数据均可作为米氏旋回分析的原始数据(Abels et

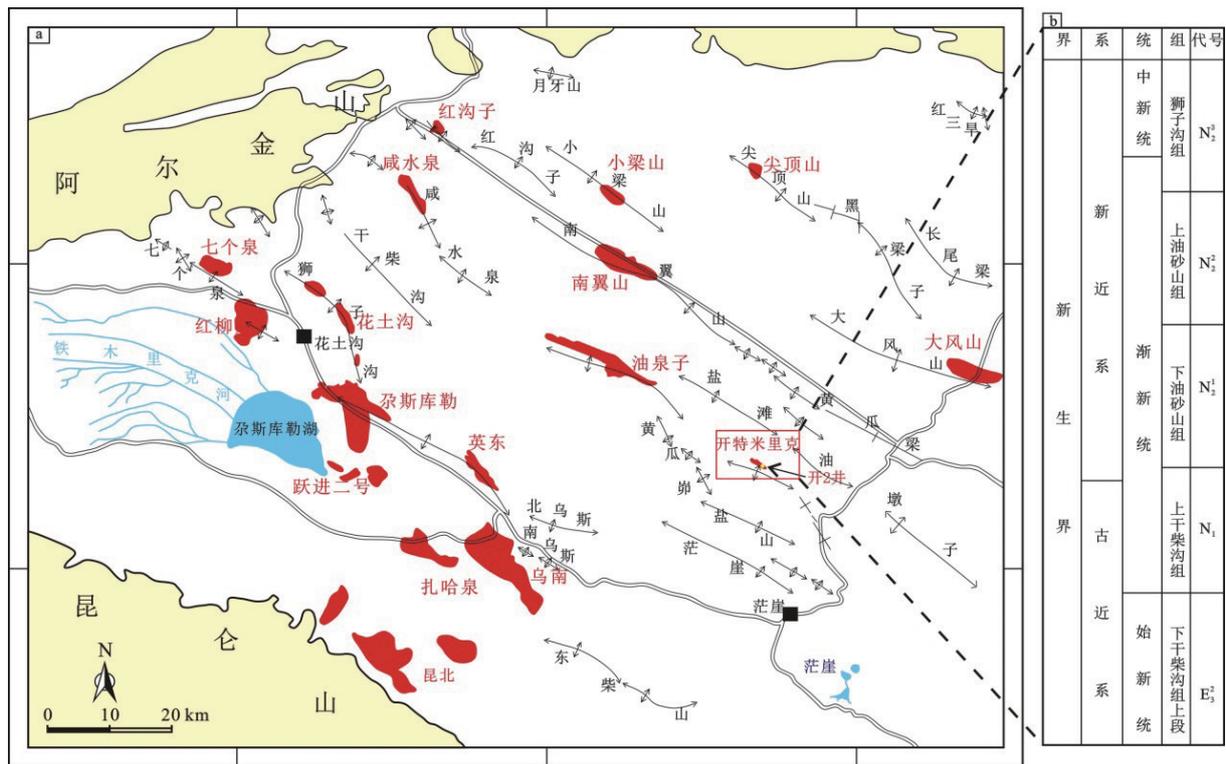


图1 柴西开特米里克地区地理位置图 (a) 及年代地层表 (b)

Fig. 1 Geographical location map (a) and chronostratigraphic table (b) of Katimirik area, western Qaidam

al., 2010)。在地下钻井剖面中,自然伽马测井曲线 (GR)具有等间距采样,连续测量和纵向分辨率高的特点,且可以敏感地反映岩性旋回和岩相韵律互层在深度域上的变化(陈茂山, 1999),可作为检测米氏旋回及湖平面变化趋势的良好资料(郑兴平等, 2004; 李斌等, 2005; 伊海生, 2011),因此广泛应用于旋回地层研究中。

本文选取开特米里克地区开2井4422~4962 m段的自然伽马曲线作为米氏旋回周期分析的参数曲线,其采样间隔为0.125 m。上干柴沟组(4422~4692 m)自然伽马曲线值介于53.72~144.95 API之间,平均值为100.71 API;下干柴沟组上段(4692~4965 m)自然伽马曲线介于46.55~137.71 API之间,平均值为94.18 API。地层中的泥质层对应自然伽马高值,而自然伽马低值对应地层中的泥灰层(Wei et al., 2020),自然伽马曲线本身显示出良好的旋回性(图2)。

### 2.2 频谱分析

频谱分析技术是研究周期性现象中最为常用的一种统计分析方法,其主要原理是运用傅立叶变换,将复合波分解成若干振幅和相位不同的简谐波,并找出其中振幅最大的波作为该复合波的主要频

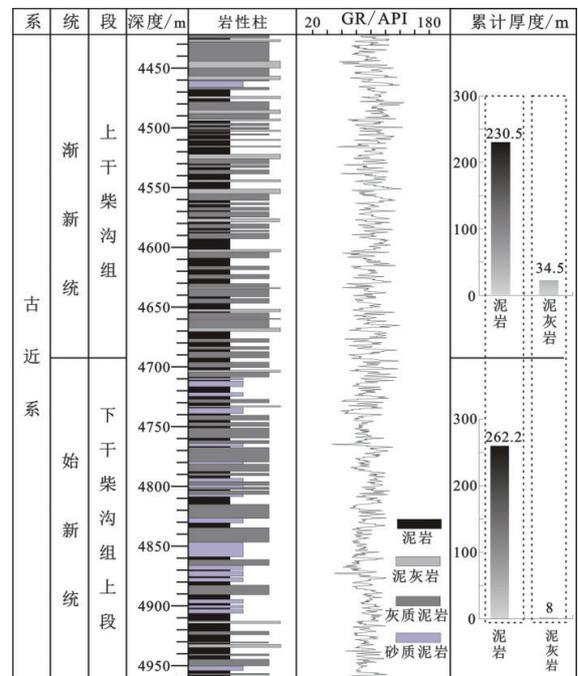


图2 柴西开特米里克地区开2井干柴沟组综合柱状图  
Fig.2 Comprehensive histogram of the Ganchaigou Formation in Well K2, Kaitemilike, western Qaidam

率(王永军等, 2007)。在旋回地层学研究中,频谱分析主要用于分析气候变化所引起的地层沉积记

录变化。将地层记录的不同周期所叠加的沉积旋回通过数学解析,分解成独立的周期旋回,以频率的形式记录成频谱曲线。

在进行米氏旋回分析之前,需要运用带通滤波的方法对上干柴沟组和下干柴沟组上段自然伽马曲线进行预处理,即去除其中的超高频信号和超低频信号,从而消除环境和噪声带来的干扰。本文采用 past 软件中的 Spectral analysis 程序进行计算,选取 0.1 的显著性水平(90% 置信度)频率进行分析。

图 3a 是开 2 井上干柴沟组自然伽马数据频谱分析结果。横坐标表示频率,纵坐标表示相对功率,处于 90% 置信度以上的主要频率值依次为:  $0.1 \text{ m}^{-1}$ 、 $0.1814 \text{ m}^{-1}$ 、 $0.2407 \text{ m}^{-1}$ 、 $0.4296 \text{ m}^{-1}$ 、 $0.5296 \text{ m}^{-1}$ ,对应的波长分别为 10 m、5.51 m、4.15 m、2.33 m、1.88 m。图中虽然存在其他超过 90% 置信度的频率,但所寻找的频率之间的比值既要符合米兰科维奇旋回周期之间的比值,且根据该频率所求得沉积速率要与该研究区沉积速率一致,因此选取以上频率值。在具体的地层中,波长表现为该旋回的沉

积厚度,所以在开 2 井上干柴沟组中检验出的高频沉积旋回厚度分别为 10 m、5.51 m、4.15 m、2.33 m、1.88 m。同样,对开 2 井下干柴沟组上段自然伽马数据进行相同的处理,如图 3b 所示,处于 90% 置信度以上的主要频率值分别为  $0.0967 \text{ m}^{-1}$ 、 $0.1784 \text{ m}^{-1}$ 、 $0.2268 \text{ m}^{-1}$ 、 $0.4201 \text{ m}^{-1}$ 、 $0.5056 \text{ m}^{-1}$ ,对应的高频沉积旋回厚度为 10.35 m、5.60 m、4.41 m、2.38 m、1.98 m。

### 2.3 Fischer 图解

Fischer 图解最早由 Fischer 在上个世纪六十年代提出(Fischer, 1964),经过几十年的发展,其适用性、使用条件、坐标轴表示等得到了多次改良,目前被广泛用于讨论相对海平面变化(Osleger, 1991; Scholle et al., 1989; Iii and Read, 1990; Montaez and Read, 1992; Sadler and Strauss, 1990)。该图解中平均厚度累计残差是将每个旋回层序单元厚度减去平均旋回厚度后得到的残差进行累计,是经过线性沉降校正的,当可容纳空间的变化速率大于沉积速率时,旋回厚度则与可容纳空间的大小呈正相关,即旋回的顶点连线代表了可容纳空间的变化情况。而可容纳空间是指沉积作用可以利用的新空间,即海平面变化与线性构造沉降速率的总和。因此经过线性沉降速率校正后的平均厚度累计残差随时间的变化即代表了海平面的升降变化。

湖盆可容纳空间受湖平面变化的影响,因此我们可以利用 Fischer 图解来分析湖盆可容纳空间的变化情况,进而反演湖平面升降变化特征。本文首先对原始自然伽马曲线进行峰值判别,得到对应的峰值点深度及 GR 值,再将各峰值点深度相减得到各旋回厚度,然后求取平均旋回厚度值为 1.28 m,接着将各旋回厚度减去平均旋回厚度得到残差,最后将残差进行累计,从而做出以井深为横坐标,以每个旋回的平均厚度累计偏差为纵坐标的 Fischer 图解(尹青等, 2015; 龚大兴等, 2011; 伊海生, 2015),该图解反映了干柴沟组的湖平面变化趋势(图 4)。

## 3 结果与讨论

### 3.1 米氏旋回确定

确定米兰科维奇旋回在地层中是否存在最常用的方法是将频谱分析计算出的各级高频旋回厚度间的比值与天文轨道周期间的比值进行对比,若两者误差较小,且根据旋回厚度和轨道周期计算出的沉积速率与研究区沉积规律符合,则表明该地区

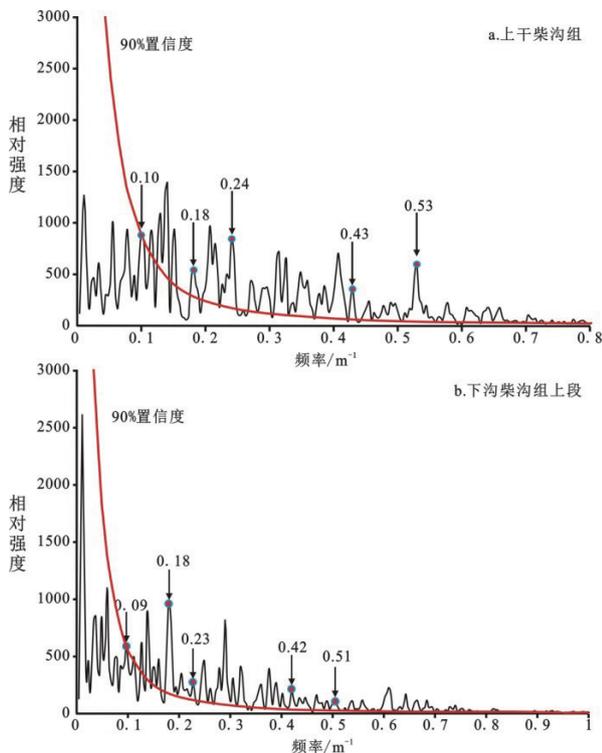


图 3 柴西开特米里克地区上干柴沟组 (a)、下干柴沟组上段 (b) 自然伽马频谱分析

Fig. 3 Natural gamma spectrum charts of the upper Ganchaigou Formation (a) and the upper part of the lower Ganchaigou Formation (b) in the Kaitemilike area, western Qaidam

地层的旋回性受天文轨道周期控制(李凤杰等, 2004; 夏国清等, 2010; Osleger and David, 1991)。

由于沉积系统的复杂性, 天文旋回可能并不总是全部记录在沉积记录中(Hajek and Straub, 2017; Zhang et al., 2019), 根据前人资料(荣建锋, 2009), 本文采用的天文轨道参数为: 偏心率周期 100 ka, 轴斜率长周期 54 ka, 轴斜率短周期 41 ka, 岁差长周期 23 ka, 岁差短周期 19 ka。上述各周期的比值为 1: 0.54: 0.41: 0.23: 0.19。如表 1 所示, 开 2 井上干柴沟组各级旋回厚度比值为 1: 0.551: 0.415: 0.233: 0.189, 与天文轨道周期比值非常接近, 误差分别为 2.04%, 1.31%, 1.2%, -0.63%, 均未超过 3%。因此, 可认为旋回厚度 10 m 对应 100 ka 的偏心率长周期, 5.51 m 和 4.15 m 分别对应 54 ka 和 41 ka

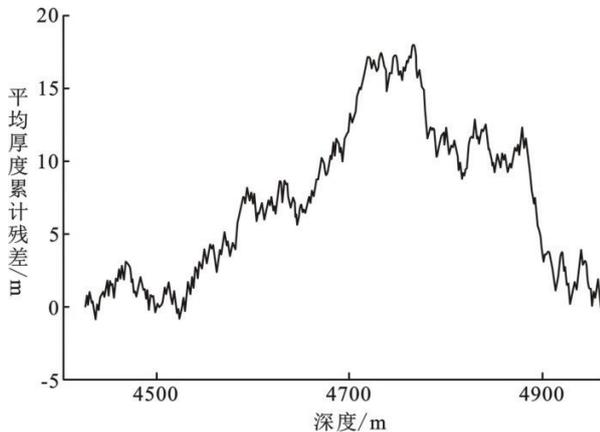


图 4 柴西开特米里克地区上干柴沟组、下干柴沟组上段 Fischer 图解 (长周期)

Fig. 4 Fischer plot of the upper Ganchaigou Formation and the upper part of lower Ganchaigou in the Kaitemirike area, western Qaidam (long period)

的轴斜率周期, 2.33 m 和 1.88 m 对应 23 ka 和 19 ka 的岁差周期; 开 2 井下干柴沟组上段各级旋回厚度比值为 1: 0.56: 0.44: 0.24: 0.20, 与天文轨道周期比值相比, 误差分别为 0.31%, 3.96%, 0.04%, 0.62%, 均未超过 4%。因此可认为旋回厚度 10.35 m 对应 100 ka 的偏心率长周期, 5.60 m 和 4.41 m 分别对应 54 ka 和 41 ka 的轴斜率周期, 2.38 m 和 1.98 m 对应 23 ka 和 19 ka 的岁差周期。

### 3.2 沉积速率讨论

此外, 确定该地层是否受米氏旋回控制还需要考虑沉积速率, 即对比分析通过旋回厚度与轨道周期计算出来的沉积速率与该研究区的沉积速率是否一致。Sun 等(2005)通过对柴达木盆地西北缘红三早剖面进行详细的磁地层学研究, 得到上干柴沟组古地磁地层年代为 35.5~26.5 Ma, 共 9 Ma。根据中国石油青海油田勘探开发研究院提供的分层数据, 上干柴沟组总沉积厚度为 912 m, 则该地区上干柴沟组平均沉积速率约为 101.3 m/Ma。张伟林(2006)通过对柴达木盆地路乐河剖面进行磁性地层研究, 得到柴达木盆地下干柴沟组高分辨率沉积速率图谱, 其平均沉积速率为 110.6 m/Ma。对于开特米里克地区上干柴沟组, 偏心率周期 100 ka 对应的旋回厚度为 10 m, 则计算出沉积速率为 100 m/Ma。同理计算出轴斜率长周期为 54 ka、轴斜率短周期 41 ka、岁差长周期 23 ka、岁差短周期 19 ka 时对应的沉积速率分别为 102.04 m/Ma、101.31 m/Ma、101.20 m/Ma、99.37 m/Ma, 求取平均值, 得到由轨道周期求得的上干柴沟组平均沉积速率为 100.79 m/Ma。同理求得开特米里克地区下干柴沟组上段偏心率周期 100 ka、轴斜率长周期为 54 ka、

表 1 柴西开特米里克地区上干柴沟组和下干柴沟组上段自然伽马曲线频谱分析结果及比例关系

Table 1 Spectrum analysis results and proportional relationship of the natural gamma curve of the upper Ganchaigou Formation and the upper part of lower Ganchaigou Formation in the Kaitemirike area

地层	频率/ $m^{-1}$	厚度/m	厚度比值	理论比值	误差率/%	轨道周期/ka
上干柴沟组	0.1	10	1	1	0	偏心率 100
	0.181 4	5.51	0.551	0.54	2.04	轴斜率长周期 54
	0.240 7	4.15	0.415	0.41	1.31	轴斜率短周期 41
	0.429 6	2.33	0.233	0.23	1.20	岁差长周期 23
	0.529 6	1.88	0.189	0.19	-0.63	岁差短周期 19
下干柴沟组上段	0.096 7	10.35	1	1	0	偏心率 100
	0.178 4	5.6	0.56	0.54	0.31	轴斜率长周期 54
	0.226 8	4.41	0.44	0.41	3.96	轴斜率短周期 41
	0.420 1	2.38	0.24	0.23	0.04	岁差长周期 23
	0.505 6	1.98	0.2	0.19	0.62	岁差短周期 19

轴斜率短周期 41 ka、岁差长周期 23 ka、岁差短周期 19 ka 对应的沉积速率分别为 103.46 m/Ma、103.78 m/Ma、107.55 m/Ma、103.50 m/Ma、104.10 m/Ma, 求取平均值, 得到开特米里克地区下干柴沟组上段由轨道周期求得的平均沉积速率为 104.48 m/Ma。将由轨道周期求得的平均速率与柴达木盆地沉积率进行对比, 我们发现上干柴沟组与下干柴沟组上段沉积速率误差分别仅为 0.5% 和 -5.53%, 表明通过旋回厚度和轨道周期计算出的沉积速率与研究区沉积速率具有一致性。

因此, 柴达木盆地开特米里克地区上干柴沟组与下干柴沟组上段存在米兰科维奇旋回, 该地区地层旋回性受天文轨道周期控制, 即地球轨道效应造成的高频湖平面变化是该地层发生沉积旋回的主要因素。

此外, 利用 MATLAB 软件对上干柴沟组与下干柴沟组上段的自然伽马曲线分别进行带通滤波处理, 得到上干柴沟组与下干柴沟组上段 100 Ka、54 Ka 和 23 Ka 周期对应的理论旋回分布图(图 5)。由图可知, 上干柴沟组中由偏心率、轴斜率和岁差控制的旋回个数分别为 28 个、50 个和 117 个, 由于不同轨道周期的单个旋回时间代表了其单次的沉积时间(黄春菊, 2014; Hinnov and Ogg, 2007), 可求得上干柴沟组平均沉积时限约为 2.73 Ma; 下干柴沟组上段中由偏心率、轴斜率和岁差控制的旋回个

数分别为 27 个、48 个和 113 个, 则平均沉积时限约为 2.62 Ma。整个柴达木盆地干柴沟组的古地磁年代以 35.5 Ma 为界分为上、下干柴沟组, 所以本文通过轨道周期求得的干柴沟组上、下界线附近的沉积时限是从 38.1 Ma 到 32.8 Ma。

### 3.3 湖平面变化讨论

通过 Fischer 图解可以看出, 开特米里克地区干柴沟组湖平面总体上经历了一次相对长周期的上升与下降过程(图 4)。其中下干柴沟组上段湖平面总体呈上升趋势, 直到末期达到最大湖平面, 进入上干柴沟组湖平面总体呈下降趋势。再利用 PAST 软件的 Sinusoidal 模块对 Fischer 图解进行滤波处理, 得到湖平面的总体波动情况。图 6 表明上干柴沟组湖平面相对较低, 处于低位期, 而下干柴沟组上段总体湖平面相对较高, 处于高位期。

气候主要包括两个方面, 即温度与湿度。温度大小表现为相对温暖与寒冷, 而湿度大小表现为相对湿润与干旱。Zachos 通过对深海岩心的研究发现, 气候温暖时米氏旋回中偏心率带通滤波强度较大, 气候寒冷时对应的偏心率带通滤波强度较小(Zachos and James, 2001), 表明偏心率的强弱能够用来判断区域温度的相对高低。通过对图 6 中上干柴沟组、下干柴沟组上段偏心率 100 ka 带通滤波分析, 结合对应的功率谱图(Li et al., 2018)(图 7), 我们不难发现, 开特米里克地区上干柴沟组旋

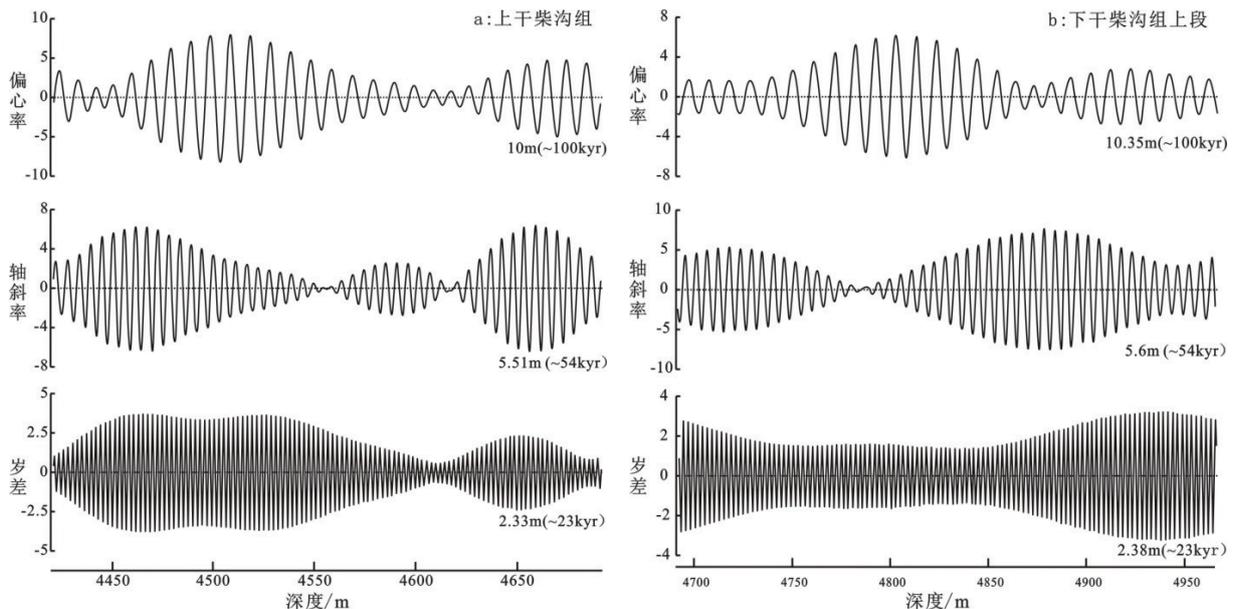


图 5 柴西开特米里克地区上干柴沟组 (a)、下干柴沟组上段 (b) 高分辨率天文年代标尺

Fig. 5 High-resolution astronomical chronological scale of the upper Ganchaigou Formation (a) and the upper part of lower Ganchaigou Formation (b) in the Ketmirik area, western Qaidam

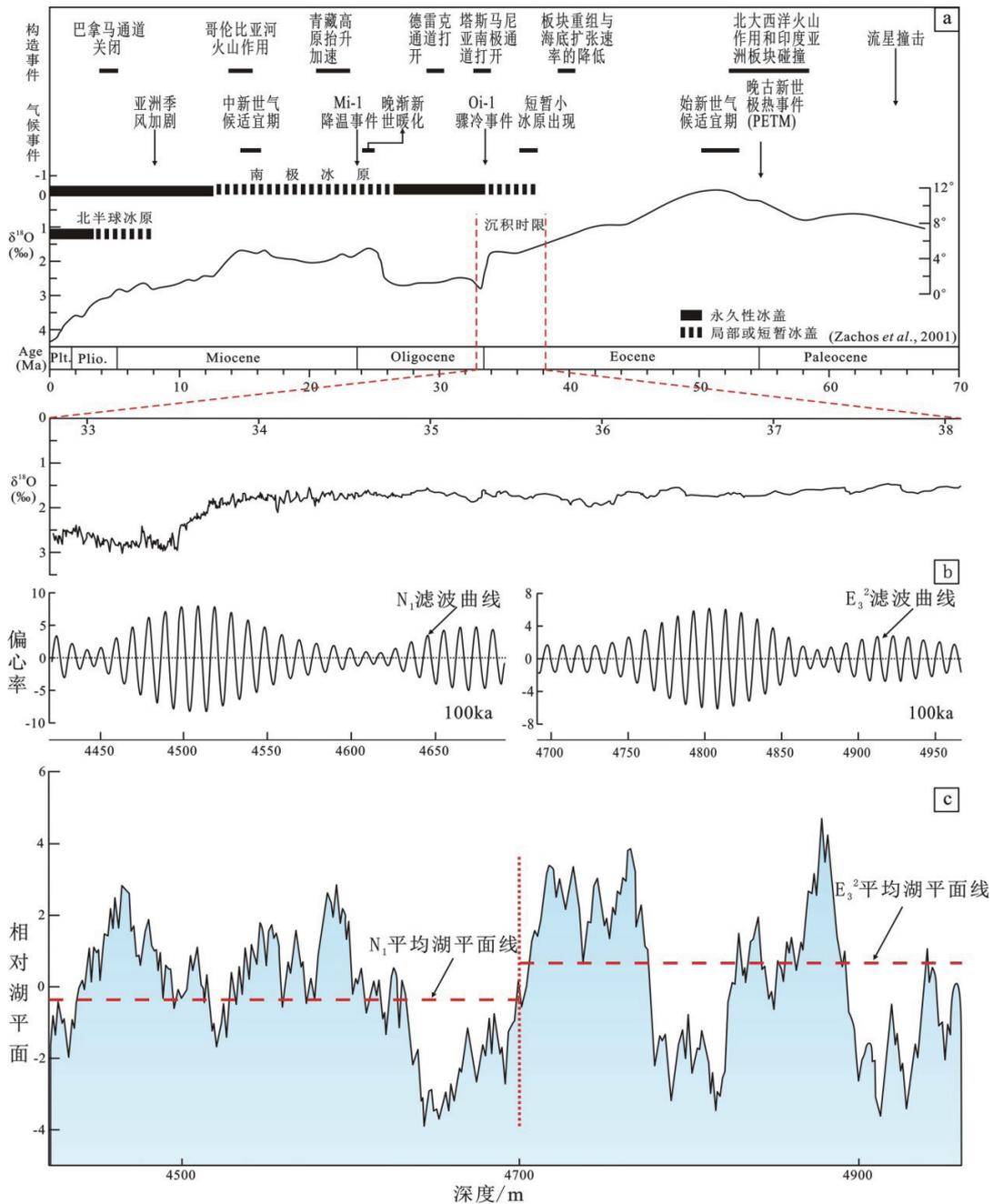
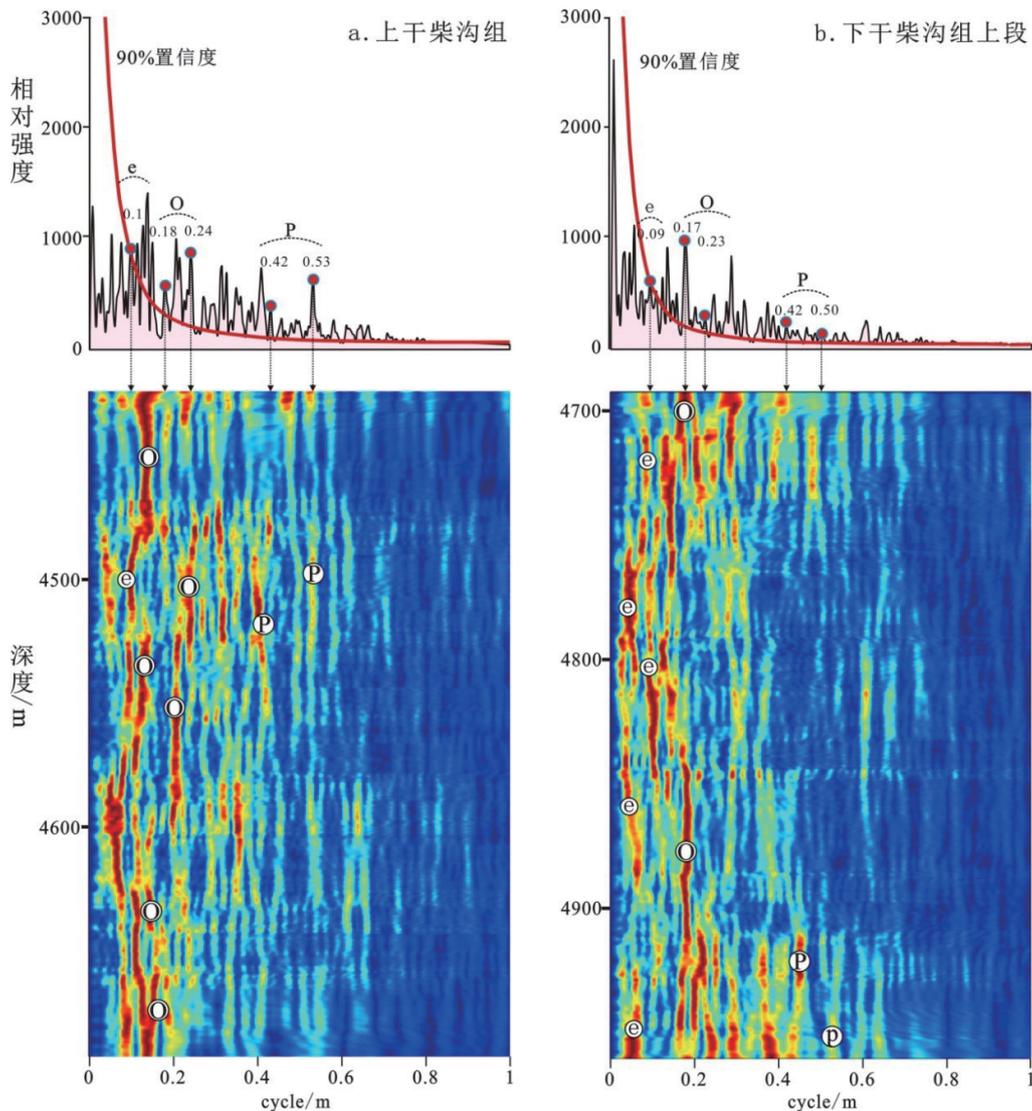


图 6 柴西开特米里克地区上干柴沟组及下干柴沟组上段湖平面变化趋势 (c)、偏心率滤波曲线 (b) 与新生代全球温度变化 (a) 对比图

Fig. 6 Comparisons of lake level change trends (c), eccentricity filter curves (b) of the upper Ganchaigou Formation and the upper part of lower Ganchaigou Formation and Cenozoic global temperature change (a), Kaitemirike area, western Qaidam

回沉积主要受轴斜率 54 ka 周期控制, 而下干柴沟组上段沉积旋回主要受偏心率 100 ka 周期控制。由此判断, 柴达木盆地开特米里克地区下干柴沟组上段(38.1~35.5 Ma)温度相对较高, 处于相对温暖期, 而到上干柴沟组(35.5~32.8 Ma)温度逐渐降低, 处于相对寒冷期。另外在  $N_1$  与  $E_3^2$  岩层累计厚度对比中(图 2),  $N_1$  中泥灰岩岩层累计厚度明显增加, 而泥

岩岩层累计厚度减少, 表明开特米里克地区上干柴沟组湿度相对干旱, 而下干柴沟组上段湿度较为湿润。可知在开特米里克地区上、下干柴沟组附近(38.1 Ma~32.8 Ma)存在较为明显的气候转变, 即由温暖湿润逐渐转化为寒冷干旱, 这与 Zachos 通过深海氧同位素反演的全球温度变化趋势具有良好一致性 (Zachos, 2001)(图 6)。柴达木盆地新生代古气候



e—偏心率短周期；O—轴斜率周期；P—岁差周期。

e-short cycle of eccentricity; O-axis slope period; P-the precession period.

图7 柴西开特米里克地区上干柴沟组(a)和下干柴沟组上段(b)功率谱图

Fig. 7 Power spectrums of the upper Ganchaigou Formation (a) and the upper part of lower Ganchaigou Formation (b) in Ketmilik area, western Qaidam

受高原隆升、全球变冷、亚洲季风等多因素影响,气候的响应可能更为复杂。由于开特米里克地区研究范围较小,我们的研究结果只是提供了盆地局部区域的气候个例,至于整个柴达木盆地或青藏高原东北部的气候变化需要进一步讨论。

综上所述,柴达木盆地开特米里克地区下干柴沟组上段沉积旋回主要受天文轨道周期中的偏心率控制,气候表现为相对温暖湿润,对应湖平面变化的高位期;上干柴沟组沉积旋回主要受天文轨道周期中的轴斜率控制,气候表现为相对寒冷干旱,对应湖平面变化的低位期。

## 4 结论

通过对开2井自然伽马曲线进行频谱分析与沉积速率的讨论,结果表明,柴达木盆地开特米里克地区上干柴沟组( $N_1$ )和下干柴沟组( $E_3^2$ )地层旋回周期与米兰科维奇地球轨道周期参数具有良好的对应性,说明天文轨道周期旋回对该地区地层高频旋回沉积具有显著影响。其中上干柴沟组中旋回厚度10 m对应100 ka的偏心率长周期,5.51 m和4.15 m分别对应54 ka和41 ka的轴斜率周期,2.33 m和1.88 m对应23 ka和19 ka的岁差周期,

由轨道周期求得的平均沉积速率为 100.79 m/Ma。下干柴沟组上段中旋回厚度 10.35 m 对应 100 ka 的偏心率长周期, 5.60 m 和 4.41 m 分别对应 54 ka 和 41 ka 的轴斜率周期, 2.38 m 和 1.98 m 对应 23 ka 和 19 ka 的岁差周期, 由轨道周期求得的平均沉积速率为 104.48 m/Ma。结合 Fischer 图解及岩性特征, 确定了柴达木盆地开特米里克地区干柴沟组上、下界线附近 (38.1~32.8 Ma) 湖平面总体上经历了一次相对长周期的升降过程。下干柴沟组上段处于湖平面上升阶段, 主要受米氏旋回中的偏心率周期控制, 气候相对温暖湿润, 对应湖平面高位期。上干柴沟组处于湖平面下降阶段, 主要受米氏旋回中的轴斜率周期控制, 气候相对寒冷干旱, 对应湖平面低位期。

## References

- Abels H A, Aziz H A, Krijgsman W, et al., 2010. Long-period eccentricity control on sedimentary sequences in the continental Madrid Basin (middle Miocene, Spain) [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 289 (1-2): 220–231.
- Berger A, Loutre M F, Dehant V, 1989. Pre-Quaternary Milankovitch frequencies [J]. *Nature*, 342 (6246): 133.
- Fischer A G, 1964. The lofter cyclothem of the Alpine Triassic [J]. *Kansas Geological Survey Bulletin*, 169 (1): 107–149.
- Hinnov L A, Ogg J G, 2007. Cyclostratigraphy and the Astronomical Time Scale [J]. *Stratigraphy*, 4 (2): 239–251.
- Hajek E A. and Straub K M, 2017. Autogenic Sedimentation in Clastic Stratigraphy [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 45: 681–709.
- Iii W, Read J F, 1990. Field and Modelling studies of Cambrian carbonate cycles, Virginia Appalachians; discussion and reply [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 60 (5): 654–687.
- Idnurm M, Cook P J, 1980. Palaeomagnetism of beach ridges in South Australia and the Milankovitch theory of ice ages [J]. *Nature*, 286 (5774): 699–702.
- Li M S, Huang C J, Hinnov L, et al., 2018. Astrochronology of the Anisian stage (Middle Triassic) at the Guandao reference section, South China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 482: 591–606.
- Milankovitch M, 1941. Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem [M]. Akademie: Royale Serbe, 133: 1–633.
- Montaez I P, Read J F, 1992. Eustatic control on early dolomitization of cyclic peritidal carbonates: Evidence from the Early Ordovician Upper Knox Group, Appalachians [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 104 (7): 872–886.
- Osleger J, 1991. Relation of Eustasy to Stacking Patterns of Meter-Scale Carbonate Cycles, Late Cambrian, U. S. A [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 61 (7): 1745–8.
- Osleger, David, 1991. Subtidal carbonate cycles: Implications for alloeyclic vs. autoeyclic controls [J]. *Geology*, 19 (9): 917–920.
- Paul E O, Dennis V K, 1999. Long-Period Milankovitch Cycles from the Late Triassic and Early Jurassic of Eastern North America and Their Implications for the Calibration of the Early Mesozoic Time-Scale and the Long-Term Behaviour of the Planets [J]. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 357 (1757): 1761–1786.
- Scholte P A, James N P, Read J F, 1989. Carbonate Sedimentology and Petrology [J]. *Short Courses in Geology*.
- Sadler P M, Strauss D J, 1990. Estimation of the completeness of stratigraphical sections using empirical data and theoretical models [J]. *Journal of Geological Society of London*, 147 (3): 471–485.
- Sun Z M, Yang Z, Pei J, et al., 2005. Magnetostratigraphy of Paleogene sediments from northern Qaidam Basin, China: Implications for tectonic uplift and block rotation in northern Tibetan plateau [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 237 (3-4): 635–646.
- Weedon G P. 2003. Time-Series and Cyclostratigraphy [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1-259.
- Wei X, Yan D, Luo P, et al., 2020. Astronomically forced climate cooling across the Eocene–Oligocene transition in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 558: 109945.
- Zhang T, Zhang C M, Fan T L, et al., 2020. Cyclostratigraphy of Lower Triassic terrestrial successions in the Junggar Basin, northwestern China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 539: 109493.
- Zachos, James C, 2001. Climate Response to Orbital Forcing Across the Oligocene-Miocene Boundary [J]. *Science*, 292 (5515): 274–278.
- Zachos J C, 2001. Trends, rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present [J]. *Science*, 292 (5517): 686–693.
- Chen M S, 1999. Two novel depth-domain frequency spectrum analysis methods for logging data and their application to sequence stratigraphy research [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 34 (1): 57–64.
- Fu G M, Li Y J, Deng Y, 2001. Depositional systems and filling patterns of the Tertiary Qaidam lake basin in the Ganchaigou region, Qinghai [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 21 (2): 39–47 (in Chinese with English abstract).
- Gong D X, Yi H S, Wu C H, et al., 2011. High-frequency carbonate depositional cycles and its response to the gamma ray well logging data and sea-level change in Permian Nanpanjiang Basin [J]. *Progress in Geophysics*, 26 (1): 287–293 (in Chinese with English abstract).
- Huang C J, 2014. The current status of cyclostratigraphy and astrochronology in the Mesozoic [J]. *Earth Science Frontiers*, 21 (2): 48–66 (in Chinese with English abstract).
- Li K Y, Yin H S, Xia G Q, 2018. Characteristics of Milankovitch cycles of Shangyoushashan and Xiayoushashan formations in Qiqequan area, western Qaidam Basin based on the spectral analysis of the logging curve [J]. *Geological Science and Technology Information*, 37 (3): 87–91 (in Chinese with English abstract).
- Li B, Meng Z F, Li X B, et al., 2005. Analysis of Milankovitch cycles of Yanchang Formation in Jing'an Oilfield [J]. *Geological Science and Technology Information*, 24 (2): 64–70.
- Li F J, Wang D Y, Cheng W. 2004. 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)*, 31 (5): 473–477.
- Li J, Hu G M, Li Q, et al., 2019. Diagenesis of the IV oil reservoirs of

- the Pliocene Xiayoushashan Formation in the Zha-X well area, Qaidam Basin, Qinghai[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 39 (3) : 65 – 72.
- Rong J F, 2009. High-frequency sedimentary cycles and genetic mechanism of the upper and lower Youshashan Formation in the Ganchaigou area of the western Qaidam Basin[D]. Chengdu University of Technology.
- Tang W Q, Yi H S, Yi F, et al., 2020. Characteristics of Milankovitch Cycles of Xia Ganchaigou Formations in Zhahaquan Area, Southwest Qaidam Basin, Based on the Spectral Analysis of the Logging Curve[A]. China Petroleum Society Petroleum Geophysical Professional Committee (SPG), International Society of Exploration Geophysicists (SEG). SPG / SEG Nanjing 2020 International Geophysical Conference Proceedings (Chinese) [C]. Petroleum Geophysical Prospecting Committee of China Petroleum Society (SPG), International Society of Exploration Geophysicists (SEG): Editorial Department of Petroleum Geophysical Exploration: 4.
- Tang L J, Jin Z J, Zhang M L, et al., 2000. An analysis on tectono-paleogeography of the Qaidam Basin, northwest China[J]. *Geoscience Frontiers*, 7 (4) : 421 – 429 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y J, Guo Z Q, Liu W H, et al., 2007. Analysis of milankovitch cycles of quaternary in sanhu area, eastern qaidam basin[J]. *Progress in Geophysics*, 22 (2) : 544 – 551 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y Q, 2014. Paleogene-Neogene sedimentary system and oil and gas distribution in western Qaidam Basin[M]. Petroleum Industry Press.
- Xia G Q, Yi H S, Huang H G, et al., 2010. Meter-scale sedimentary cycles and their possible genetic mechanism of Middle Jurassic Xiali Formation in Yanshiping area, North Tibet[J]. *China Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 37 (2) : 133 – 139.
- Yin Q, Yi H S, Xia G Q, et al., 2015. Accommodation space and Milankovitch orbit cycle sequence of the Paleogene stratigraphic frames in Lunpola basin based on the spectrum analysis of the logging curve[J]. *Progress in Geophysics*, 30 (3) : 1288 – 1297 (in Chinese with English abstract).
- Yi H S, 2011. Application of well log cycle analysis in studies of sequence stratigraphy of carbonate rocks[J]. *Journal Of Palaeogeography*, 13 (4) : 456 – 466 (in Chinese with English abstract).
- Yi H S, 2015. The Waveform Graphic Analysis of Cyclic Stacking Patterns in Sedimentary Successions and Detection Methods of Cyclostratigraphic Sequences[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33 (5) : 855 – 864 (in Chinese with English abstract).
- Zheng X P, Zhou J G, Wu X N, 2004. High-frequency Sequence Quantitative Analysis Technology of Carbonate Rock and Its Application[J]. *China Petroleum Exploration*, 9 (5) : 26 – 30+2 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W L, 2006. Cenozoic Uplift of the Tibetan Plateau: Evidence from High Resolution Magnetostratigraphy of the Qaidam Basin[D]. Lanzhou University.
- Zheng X M, Yang L, Yi D H, et al., 2019. Distribution of gypsum and sulfur isotopes in the Palaeogene strata, western Qaidam Basin, Qinghai[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 39 (4) : 65 – 70.
- Zhou B, Tang J, Liao C, et al., 2013. High-resolution sequence stratigraphic analysis of the Upper Ganchaigou Formation in the Youshashan Oil Field, Qaidam Basin, Qinghai[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 33 (3) : 27 – 33 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈茂山, 1999. 测井资料的两种深度域频谱分析方法及在层序地层学研究中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 34 (1) : 57 – 64.
- 付国民, 李永军, 邓颖, 2001. 柴达木盆地干柴沟地区第三系湖盆边缘斜坡带沉积体系及湖盆充填模式分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 21 (2) : 39 – 47.
- 龚大兴, 伊海生, 吴驰华, 等, 2011. 南盘江盆地二叠系高频沉积旋回的测井响应及海平面变化趋势[J]. *地球物理学进展*, 26 (1) : 287 – 293.
- 黄春菊, 2014. 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*, 21 (2) : 48 – 66.
- 李莹宇, 伊海生, 夏国清, 2018. 基于测井曲线频谱分析柴达木盆地西部七个泉地区上、下油砂山组米兰科维奇旋回特征[J]. *地质科技情报*, 37 (3) : 87 – 91.
- 李斌, 孟自芳, 李相博, 等, 2005. 靖安油田延长组米兰柯维奇沉积旋回分析[J]. *地质科技情报*, 24 (2) : 64 – 70.
- 李凤杰, 王多云, 程微, 2004. 应用自然伽马曲线反演陇东地区延安组沉积旋回[J]. *成都理工大学学报(自科版)*, 31 (5) : 473 – 477.
- 李军, 胡光明, 李强, 等, 2019. 柴达木盆地扎X井区上新统下油砂山组IV油层组成岩作用研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 39 (3) : 65 – 72.
- 荣建锋, 2009. 柴达木盆地西部干柴沟地区上、下油砂山组高频沉积旋回及成因机制研究[D]. 成都理工大学.
- 唐闻强, 伊海生, 伊帆, 等, 2020. 基于测井曲线频谱分析柴西南扎哈泉地区下干柴沟组米兰科维奇旋回特征[A]. 中国石油学会石油物探专业委员会 (SPG)、国际勘探地球物理学家学会 (SEG). SPG/SEG 南京 2020 年国际地球物理会议论文集 (中文) [C]. 中国石油学会石油物探专业委员会 (SPG)、国际勘探地球物理学家学会 (SEG): 石油地球物理勘探编辑部: 4.
- 汤良杰, 金之钧, 张明利, 等, 2000. 柴达木盆地构造古地理分析[J]. *地学前缘*, 7 (4) : 421 – 429.
- 王永军, 郭泽清, 刘卫红, 等, 2007. 柴达木盆地东部三湖地区四系米兰柯维奇旋回分析[J]. *地球物理学进展*, 22 (2) : 544 – 551.
- 王艳清, 2014. 柴达木盆地西部地区古近-新近系沉积体系与油气分布[M]. 石油工业出版社.
- 夏国清, 伊海生, 黄华谷, 等, 2010. 藏北雁石坪地区夏里组米级沉积旋回及成因[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 37 (2) : 133 – 139.
- 尹青, 伊海生, 夏国清, 等, 2015. 基于测井曲线频谱分析在伦坡拉盆地古近系米氏旋回层序及可容空间变化趋势中的研究[J]. *地球物理学进展*, 30 (3) : 1288 – 1297.
- 伊海生, 2011. 测井曲线旋回分析在碳酸盐岩层序地层研究中的应用[J]. *古地理学报*, 13 (4) : 456 – 466.
- 伊海生, 2015. 沉积旋回叠置形式的波形分析及旋回层序划分方法[J]. *沉积学报*, 33 (5) : 855 – 864.
- 郑兴平, 周进高, 吴兴宁, 2004. 碳酸盐岩高频层序定量分析技术及其应用[J]. *中国石油勘探*, 9 (5) : 26 – 30+2.
- 张伟林, 2006. 柴达木盆地新生代高精度磁性地层与青藏高原隆升[D]. 兰州大学.
- 郑希民, 杨柳, 易定红, 等, 2019. 柴达木盆地西部古近系石膏及其硫同位素分布特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 39 (4) : 65 – 70.
- 周斌, 汤军, 廖春, 等, 2013. 柴达木盆地油砂山油田上干柴沟组高分辨率层序地层分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 33 (3) : 27 – 33.