



移动阅读

罗力铭, 余蔓琳, 李琦, 等, 2025. 松科3井下白垩统登娄库组米兰科维奇旋回识别及其古气候意义[J]. 沉积与特提斯地质, 45(1): 112-119. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.08010](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.08010)

LUO L M, YU M L, LI Q, et al., 2025. Milankovitch cycle identification of Dengloulou Formation in Songliao Basin and its paleoclimate significance[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 45(1): 112-119. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.08010](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.08010)

## 松科3井下白垩统登娄库组米兰科维奇旋回识别及其古气候意义

罗力铭<sup>1</sup>, 余蔓琳<sup>1</sup>, 李琦<sup>2</sup>, 吴舟凡<sup>2</sup>, 黄永建<sup>1\*</sup>

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083)

**摘要:** 在白垩纪大陆科学钻探工程的推动下, 松辽盆地成为白垩纪陆相古气候研究的热点地区之一, 其中松辽盆地古气候变化与全球气候变化的一致性和差异性是目前关注的重点。本文选择松辽盆地松科3井获得的登娄库组岩心, 通过X射线荧光(XRF)扫描获得化学风化指标Rb/Sr比值, 应用时间序列分析方法开展旋回地层学研究。分析结果表明: (1) 松科3井登娄库组XRF扫描曲线中化学风化指标Rb/Sr的变化, 指示了登娄库组沉积期间气候由湿润逐渐变得干旱的过程; (2) 松科3井登娄库组最优沉积速率约为14.43 cm/ka, 结合地层深度域的气候旋回波长, 利用比值法识别出登娄库组地层中记录了白垩纪中期岁差(20~19 ka)、斜率(45~39 ka)、短偏心率(130~100 ka)和长偏心率(450~390 ka)等气候旋回周期信号, 判定登娄库组记录了米兰科维奇旋回信息; (3) 应用功率能量分解方法, 结果表现为, 早白垩世登娄库组以偏心率和岁差信号为主, 斜率信号非常弱, 这与全球气候变化记录具有一致性。

**关键词:** 松辽盆地; 登娄库组; 米兰科维奇旋回; 古气候

中图分类号: P532

文献标识码: A

## Milankovitch cycle identification of Dengloulou Formation in Songliao Basin and its paleoclimate significance

LUO Liming<sup>1</sup>, YU Manlin<sup>1</sup>, LI Qi<sup>2</sup>, WU Zhoufan<sup>2</sup>, HUANG Yongjian<sup>1\*</sup>

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Under the promotion of the Cretaceous continental scientific drilling project, the Songliao Basin has become one of the hotspots for the Cretaceous terrestrial paleoclimate research. Among these studies, the consistency and differences between the paleoclimate change of the Songliao Basin and coeval global climate change are currently the focus of attention. In this paper, the cores of the Dengloulou Formation obtained from the continental scientific drilling of Well Songke-3 in the Songliao Basin were selected. The chemical weathering index Rb/Sr ratio was obtained through XRF scanning, and the time series analysis method was applied to study the cyclostratigraphy. The analysis results show that: (1) The variation in the chemical weathering index Rb/Sr ratio,

收稿日期: 2023-06-25; 改回日期: 2023-08-21; 责任编辑: 黄春梅; 科学编辑: 邓奇

作者简介: 罗力铭(2002—), 男, 地质学专业。E-mail: [2843694942@qq.com](mailto:2843694942@qq.com)

通信作者: 黄永建(1974—), 男, 副教授, 主要从事深时古气候学和化学地层学研究工作。E-mail: [huangyj@cugb.edu.cn](mailto:huangyj@cugb.edu.cn)

资助项目: 国家自然科学基金(42272134, 41972112)

as shown in the XRF scanning curve, indicates the process of the climate from humid to arid during the deposition of the Dengloulou Formation. (2) The optimal deposition rate of the Dengloulou Formation is about 14.43 cm/ka, which can be combined with the wavelength of the depth domain to identify the Milankovitch cycles preserved in the Dengloulou Formation, including precession (20-19 ka), obliquity (45-39 ka), short eccentricity (130-100 ka), and long eccentricity (450-390 ka) signals of the climate cycle. (3) With the application of power decomposition analysis (PDA), it is shown that eccentricity and precession signals are dominant, while the obliquity signal is very weak in the Early Cretaceous Dengloulou Formation. This is consistent with the global climate change record.

**Key words:** Songliao Basin; Dengloulou Formation; Milankovitch cycle; paleoclimate

## 0 引言

通过对白垩纪温室气候状态陆地气候系统的变化规律的研究,可为当今全球变暖问题的解决提供重要参照(Foster et al., 2017; Larson et al., 1991)。松辽盆地保存了完整的早白垩世到古近纪早期地球温室气候沉积记录(席党鹏等, 2021),成为近年来白垩纪陆地古气候研究的热点地区(Chen, 1987; 许志琴等, 2016; Wang et al., 2013a)。松辽盆地古气候学研究的一个重要方面,就是松辽盆地的古气候记录与全球气候变化的同步性和差异性( Wang et al., 2013b)。从松科1井的系列研究成果来看,在构造时间尺度上(大于1个百万年)松辽盆地在晚白垩世与全球气候变化基本保持同步,还存在显著的区域变化特点。而随着松辽盆地大陆科学钻探工程的完成,有必要将松辽盆地的上述气候变化特征研究引向深入。

无论在冰室还是温室气候条件下,地球自转和公转参数(偏心率、斜率和岁差)周期性变化引起的日照在不同纬度的分布是驱动气候变化的主要动力(Hays et al., 1976)。在地球系统的不同演化阶段,对上述参数表现出不同的响应特征(Ruddiman, 2014)。近三十年的研究发现,中生代温室地球气候系统主要表现出对偏心率和岁差信号强烈响应的特点(Boulila et al., 2011);但是在晚白垩世早期赛诺曼到康潘阶,中纬度海相表层系统表现出强烈的斜率信号(Laurin et al., 2015; Wendler et al., 2016)。上述现象在青山口组和嫩江组的气候旋回研究中已经得到了证实(Li et al., 2022a; Huang et al., 2021),表明松辽盆地于晚白垩世期间在轨道时间尺度上与全球气候变化的一致性。但在此之前,也就是在白垩纪中期松辽盆地是否表现出与全球一致的、以偏心率和岁差为主的气候变化特征,还有待进一步考察(Li et al., 2022b)。

从松辽盆地整个地层序列来看,位于泉头组和营城组之间的登娄库组,发育于松辽盆地的断陷-拗陷的构造阶段,在时间上位于早晚白垩世界限附近,古气候意义极为重要。作为该项工程的收尾部分,松科3井连续取心获取了登娄库组-泉头组河湖相连续地质记录,所收取的登娄库组岩心成为本项目的主要研究内容(Wang and Chen, 2015)。本文以松科3井登娄库组的化学风化指标Rb/Sr比值为研究对象,进行时间序列分析和功率分解分析(power decomposition analysis, PDA),探讨松辽盆地天文轨道驱动响应情况,并与同时期海相记录做对比,从而对上述问题开展进一步探讨。

## 1 地质背景

松辽盆地是我国最大的中生代陆相含油气盆地(总面积约 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$ ),大地构造上位于西伯利亚-蒙古板块、华北板块和太平洋板块之间(瞿雪姣等, 2021)。松辽盆地由北部倾没区、中部拗陷区、东北隆起区、东南隆起区、西南隆起区和西部斜坡区等6个次级构造单元组成(图1)。松辽盆地构造演化经过了三个阶段:断陷期(105 Ma之前)、拗陷期(105~79.1 Ma)和构造反转期(79.1~64 Ma)(Wang et al., 2016)。在前中生代变质岩和火成岩基之上,松辽盆地在断陷期主要充填了早白垩世火石岭子组、沙河子组和营城组,主体上为包括砾岩及火山岩层段在内,以砂泥岩为主的含煤层系。拗陷期层序构成了盆地充填的主要地层序列,包括登娄库组、泉头组、青山口组、姚家组和嫩江组,其中登娄库组、泉头组和姚家组主要为红色的含砾岩层段的砂泥岩地层,构成大庆油田的主要储层;而灰黑色-黑色泥岩为主的青山口组和嫩江组则构成了松辽盆地主要烃源岩。进入盆地反转期之后,松辽盆地主要充填了以河流和三角洲相为主的四方台和明水组地层。松辽盆地完整的白

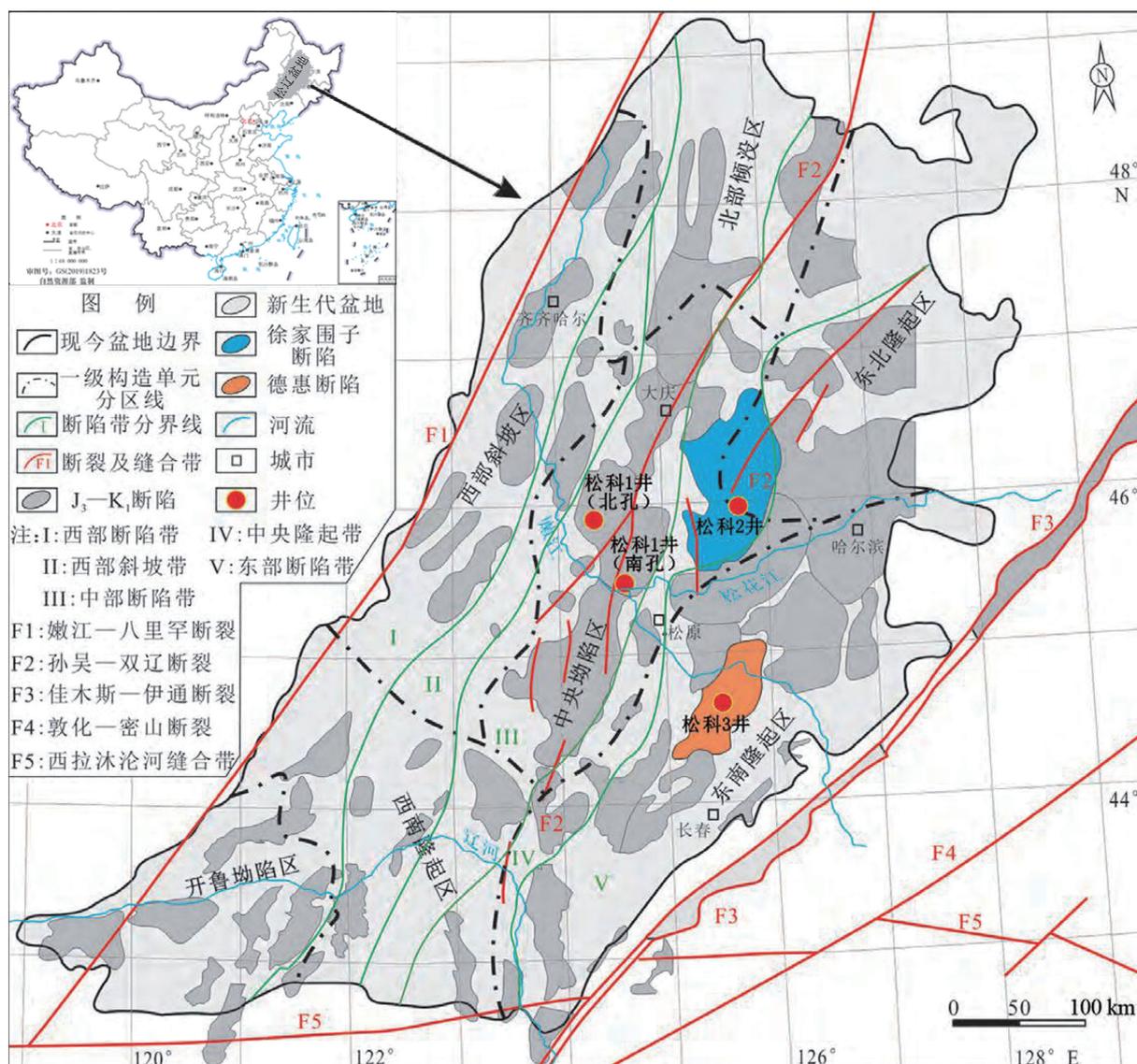


图1 松辽盆地构造图 (据 Feng et al., 2010; Wang et al., 2013b)

Fig. 1 Structural map of the Songliao Basin (modified from Feng et al., 2010; Wang et al., 2013b)

巫纪沉积序列, 为开展中国东北地区白垩纪温室气候变化规律研究奠定了物质基础(Wang et al., 2016)。

## 2 研究材料与方法

本次研究的登娄库组岩心材料, 来自于松辽盆地德惠断陷的松辽盆地国际大陆科学钻探工程松科3井。松科3井主要获取了登娄库组—泉头组地层, 地层回收率达到99%。德惠断陷的登娄库组不整合于营城组之上、假整合于泉头组之下, 粗碎屑岩和细碎屑岩各占50%左右。从登娄库组二段到四段, 粗砂岩和砾岩含量逐渐减少, 粉砂岩和细砂岩逐渐增多(高航等, 2023)。该地区登娄库组

沉积相主要以河流相沉积为主, 同时包含少量的滨浅湖沉积。

XRF扫描分析是一种基于能量色散原理, 将测得的元素X射线荧光相对强度转化为元素含量的测试方法(马坤元等, 2016), 具有能够进行快速、无损分析以及提供具有高分辨率数据的优势(Croudace and Rothwell, 2015)。与传统的波长色散和XRF分析相比, XRF扫描非常适合于海洋和陆地岩心材料的连续分析, 已经成为从新角度重建古气候和古环境演化的一种主流方法。在XRF所获取的元素数据中, 由于Rb、Sr的地球化学性质相近, 但在化学风化中活性不同, Rb/Sr比值可以作为判断化学风化强度的一个指标(Unkel et al.,

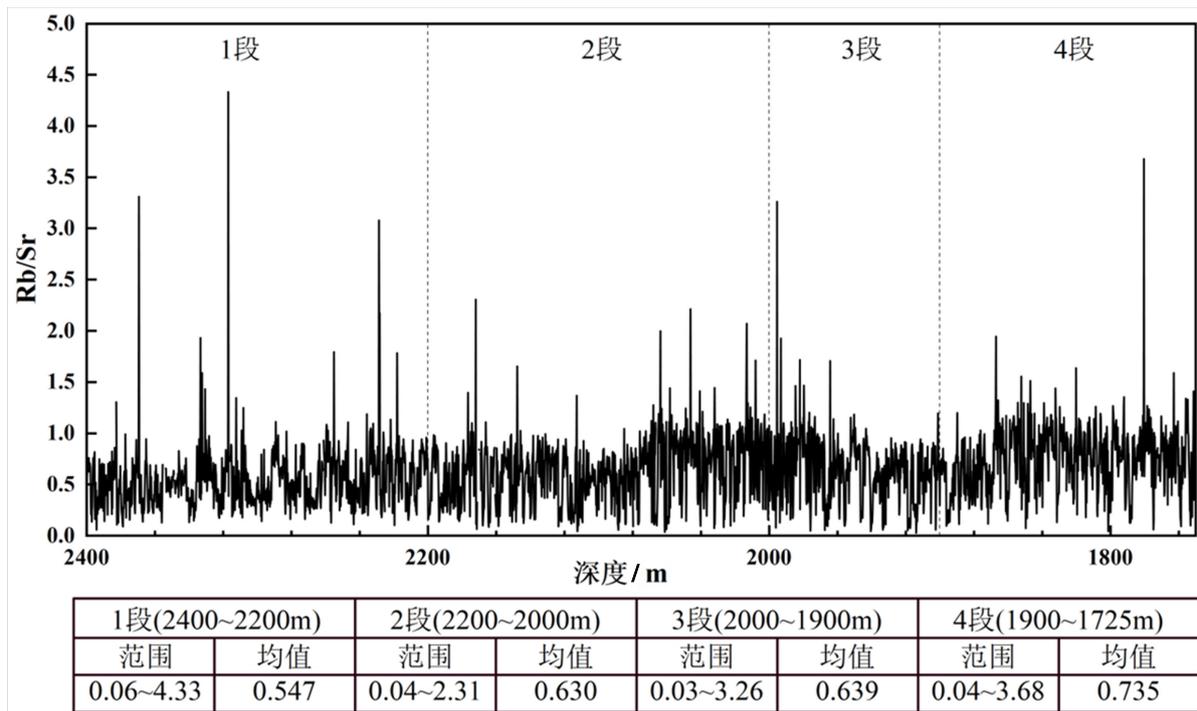


图 2 松科 3 井登娄库组 Rb/Sr XRF 扫描成果及计算结果

Fig. 2 Rb/Sr XRF scanning results and calculation results of the Denglouku Formation in Well Songke-3

2010; Arnaud et al., 2012; Fernande et al., 2013)。本文利用所获取岩心 XRF 扫描的 Rb/Sr 比值(图 2)进行气候旋回分析(扫描间距为 0.5 m)。

近年来,由北京大学李明松等开发的 Acycle 软件成为国际上古气候旋回分析的主要工具。本文时间序列分析所有步骤均使用 Acycle 2.6 软件进行(Li et al., 2019)。在数据预处理(如插值、去趋势等)的基础上,根据本文的研究需要,主要采用如下步骤进行 Rb/Sr 比值气候旋回分析:

#### (1) MTM 与 EHA 分析

能谱分析方法基于评估时间序列能量随频率变化的分布(Li et al., 2019),确定出时间序列信号中的周期性成分。应用 Matlab 脚本“pmtm”,进行多窗谱分析(multitaper method of spectral analysis, MTM)(Thomson, 1982),得到登娄库组地层在深度域上的气候旋回波长系列;应用 Matlab 算法“evofft”进行演化谐波分析(evolutionary harmonic analysis, EHA)(Kodama and Hinnov, 2014),得到该系列波长在深度域的演化特征。

#### (2) 沉积速率模拟

相关系数(correlation coefficient, COCO)方法

可识别地层旋回序列中的天文驱动力,准确评估沉积速率(Li et al., 2019)。根据 La2004 天文数值解(Laskar, 2004),基于零假设和相关系数水平,获得最佳沉积速率。

#### (3) 气候旋回识别

在沉积速率模拟的基础上,结合第一步所获得的登娄库组深度域气候旋回波长序列,利用波长比值法识别出地层中可能保存的岁差、斜率和长-短偏心率等信号。由于登娄库年龄在 100 Ma 左右(Wang et al., 2016)该波长比值主要根据 La2004 天文数值解在 100 Ma 左右的取值进行气候旋回识别。

#### (4) PDA 分析

能量分解分析方法(power decomposition analysis, PDA)主要用于计算某频带内的能量、总能量及其比值,识别岁差、斜率和偏心率对气候变化的相对贡献率。本文计算使用 Matlab 脚本“pda.m”(Li et al., 2016),分析登娄库组沉积时期各个轨道参数对其气候变化的贡献。PDA 过程遵循 Petit 等人提出的特定天文参数的功率比概念,流动功率与总功率之比是两个截止频率之间的倾

斜功率与总功率之比。功率比( $R$ ):

$$R = \frac{\sum_{i=f_1}^{f_2} P_{(i)}}{\sum_{j=f_{\min}}^{f_{\max}} P_{(j)}}$$

其中 $f_{\max}$ 和 $f_{\min}$ 为估计总功率的截止频率, $f_1$ 和 $f_2$ 是估计给定轨道带的截止频率。 $P_{(i)}$ 和 $P_{(j)}$ 分别为估计频段的功率以及总功率。

### 3 结果

#### 3.1 登娄库组 Rb/Sr 比值变化

基于 Rb、Sr 元素的不同地球化学行为, Rb/Sr 的比值可以作为判断化学风化强度的一个指标 (Unkel et al., 2010; Arnaud et al., 2012; Fernande et al., 2013)。在登一段(2 400~2 200 m), 松科 3 井登娄库组 XRF 扫描 Rb/Sr 曲线基本保持平缓; 在登二段(2 200~2 000 m), Rb/Sr 缓慢上升; 在登三段(2 000~1 900 m), Rb/Sr 缓慢下降; 到登四段(1 900~1 725 m)之后, Rb/Sr 又重新回复缓慢上升的趋势 (图 2)。

#### 3.2 米兰科维奇旋回识别

本次研究利用松科 3 井登娄库组地层古气候指标 Rb/Sr 作为米兰科维奇旋回分析的对象, 对它

们进行多窗谱分析(multitaper method of spectral analysis, MTM)以及连续滑动窗口的频谱分析(evolutionary harmonic analysis, EHA), 其分析结果如图 3 所示。在 Rb/Sr 深度序列中识别出 14.1 m, 6.4 m, 2.7~3.0 m 沉积周期。进行相关系数法(COCO)模拟, 获得松科 3 井登娄库组最优沉积速率约为 14.43 cm/ka。将登娄库组序列数据由深度域转换为时间域, 得到 20~19 ka、45~39 ka、130~100 ka、450~390 ka 的旋回周期。由于登娄库年龄在 100 Ma 左右(Wang et al., 2016), 根据 La2004 天文数值解在 100 Ma 左右的取值, 利用波长比值法识别出登娄库地层中确实较为完整地分别保存了岁差(20~19 ka)、斜率(45~39 ka)和短(130~100 ka)-长偏心率(450~390 ka)等信号。

#### 3.3 PDA 分析结果

应用能量分解分析方法(PDA)对松科 3 井的 Rb/Sr 比值进行分析。偏心率、斜率、岁差分别对应图中的灰色、橙色以及蓝色区域, 带宽范围分别为 0.001~0.015 ka<sup>-1</sup>、0.022~0.030 ka<sup>-1</sup>以及 0.038~0.054 ka<sup>-1</sup>(图 4)。结果表明登娄库组的偏心率、斜率、岁差的相对比例分别为 13.6%~71.5%(均值 36.0%)、3.2%~23.6%(均值 10.4%)和 9.0%~31.6%

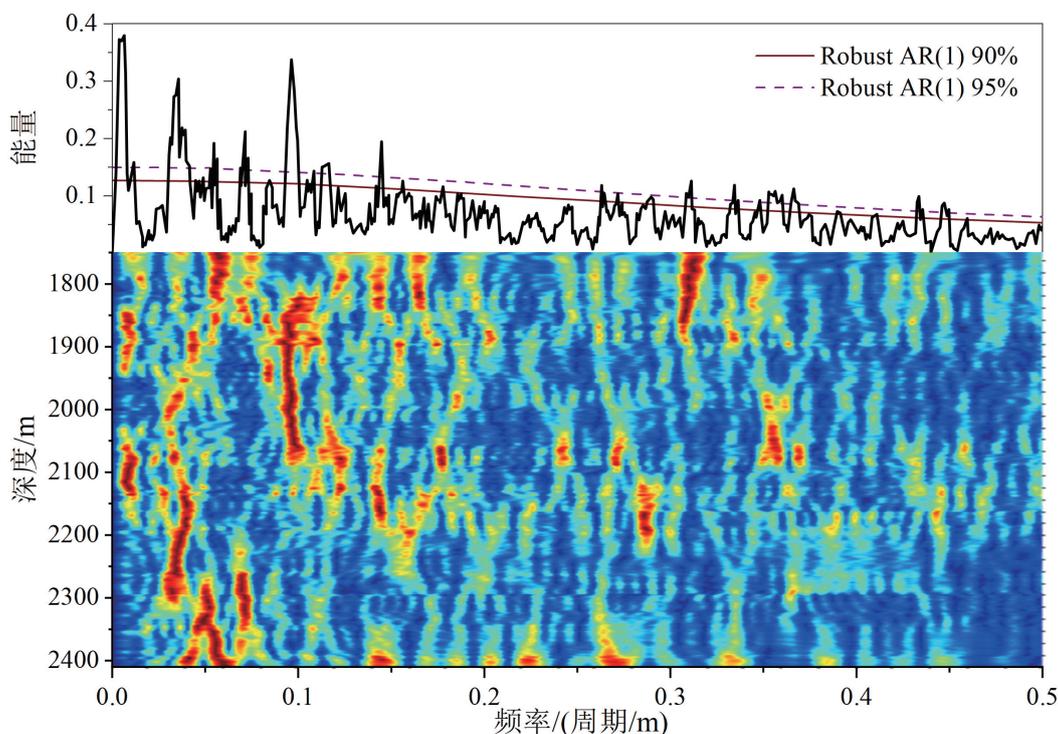
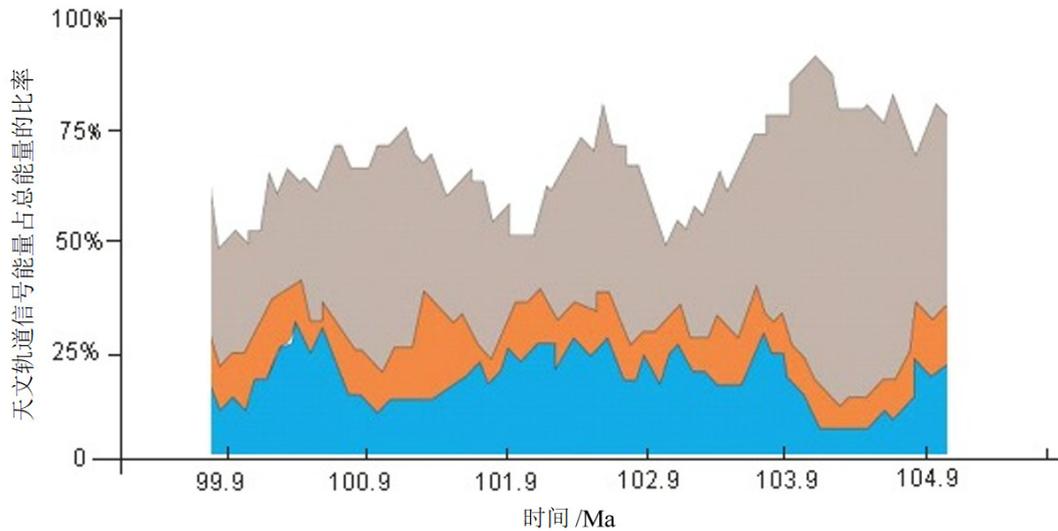


图 3 松科 3 井登娄库组元素指标 MTM 及 EHA 功率谱图

Fig. 3 MTM and EHA power spectrum diagram of element indices of the Denglouku Formation in Well Songke-3



灰色、橙色和蓝色区域分别对应偏心率、斜率和岁差

图4 松科3井登娄库组元素指标PDA能量分解分析图

Fig. 4 PDA energy decomposition analysis diagram of element indices of the Denglouku Formation in Well Songke-3

(均值 19.2%), 表现出以偏心率和岁差信号为主、斜率信号最弱的特点。

## 4 讨论

### 4.1 登娄库组古气候变化特征

基于 Rb、Sr 元素的不同地球化学行为, Rb/Sr 的比值可以作为判断风化强度的一个指标 (Unkel et al., 2010; Arnaud et al., 2012; Fernande et al., 2013)。Rb 等碱性元素可溶于水, 风化过程中优先被淋滤, Rb 的含量随风化强度的增强而降低 (Muhs et al., 2001)。Sr 受风化作用和水下氧化还原作用的影响很弱, 因此高的 Rb/Sr 值指示了物理风化强于化学风化的干旱条件。Rb/Sr 值越高, 表明化学风化越弱, 气候越偏向干旱; 反之, 则气候越偏向湿润 (Pang and Huang, 2001; Jin and Zhang, 2002)。

由图2可知, 登一段, 元素曲线基本保持平缓; 自登二段始, Rb 的含量明显增加, 反映了碎屑沉积物输入的增加, 物源的供给速度大于可容纳空间增加的速度, 气候相对干旱; 在登三段, Rb 开始下降, 同时, Rb/Sr 比值也缓慢下降至较低值, 反映气候较为湿润; 在登四段, Rb/Sr 比值开始缓慢上升, 说明气候由湿润逐渐向干旱转变。

据此, 可根据登娄库组上述段的气候变化大致划分出三个阶段: 第一个阶段为登一段, 气候变化不明显, 较为稳定; 第二个阶段为登二段, 气候偏向

干旱; 第三个阶段为登三、登四段, 气候起初偏向湿润, 后由湿润逐渐变得干旱。

### 4.2 米兰科维奇旋回识别

通过近些年来对松辽盆地地层的系列研究可以发现, 从松科1井到松科3井, 均表明在松辽盆地陆相沉积地层中保留有较为良好的米兰科维奇旋回信号, 非常适合进行旋回地层学的相关研究 (Wu et al., 2013, 2014)。鉴于目前尚未发现松科3井中登娄库组的绝对年龄锚点, 本文采用浮动天文轨道周期, 采用比值法进行米兰科维奇旋回识别。比值法是目前绝大多数旋回地层研究采用的天文检验方法, 通过频谱分析获取的旋回周期之比与天文轨道参数的周期之比一致, 即可认为沉积记录中包含米氏旋回。由图3可知, 在松科3井登娄库组地层中观察到了明显的大约为 2.7~3.2 m、5.6~6.6 m、14~19 m、55~65 m 的周期性信号, 其波长之比与米兰科维奇信号中的岁差、斜率、短偏心率、长偏心率的周期之比(约 1 : 2 : 5 : 20)近似。再结合 COCO 模拟分析结果, 松科3井登娄库组最优沉积速率为 ~14.43 cm/ka。可将登娄库组序列数据由深度域转换为时间域, 得到 20~19 ka、45~39 ka、130~100 ka 和 450~390 ka 的旋回周期, 这些周期都可以很好地被解释为岁差、斜率、短偏心率和长偏心率周期。因此, 可以判定登娄库组中记录了米兰科维奇气候旋回信号。

### 4.3 登娄库组气候旋回的意义

根据引言部分的讨论,白垩纪温室地球气候系统主要表现出对偏心率和岁差信号的强烈的响应特点,如西特提斯区域的法国、意大利、西班牙,在白垩纪早期主要表现出以偏心率和岁差信号(特别是偏心率信号)为主,斜率信号非常弱的特点,这可能与西特提斯大洋古季风的发育有关;但是在赛诺曼时期之后,由于某种现在未知的机制,西特提斯海洋沉积表现出以斜率为主的特点(Laurin et al., 2015; Wendler, et al., 2016)。前期研究发现,白垩纪晚期的青山口组和嫩江组以斜率信号为主,这与同时期的海相记录一致。

此次研究发现,更早时期的登娄库组(100 Ma左右),其气候旋回的信号相对比例中,排在前两位的是偏心率和岁差,分别为为13.6%~71.5%(均值36.0%)和9.0%~31.6%(均值19.2%);而斜率的信号最弱,其波动范围为3.2%~23.6%(均值10.4%)。这与同时期的相近纬度的海相记录如意大利、法国等西特提斯地区是一致的。因此本项研究再次表明,在轨道时间尺度上,松辽盆地基本上与全球气候保持一致的变化特征。

## 5 结论

本文以松科3井登娄库组岩心 Rb/Sr 比值为研究对象,进行米兰科维奇旋回识别及古气候研究,主要得到以下几点认识:

(1)登娄库组的气候变化大致划分为三个阶段:第一个阶段是登一段,气候变化不明显,较为稳定;第二个阶段是登二段,气候偏向干旱;第三个阶段是登三、登四段,气候起初偏向湿润,后由湿润逐渐变得干旱。

(2)松科3井登娄库组保存有大约为2.7~3.2 m、5.6~6.6 m、14~19 m、55~65 m的波长信号,其波长比值与天文轨道信号相近。沉积速率模拟(COCO)分析结果表明,松科3井登娄库组最优沉积速率约为14.43 cm/ka,结合地层深度域的气候旋回波长,利用比值法识别出登娄库组地层中记录了白垩纪中期岁差(20~19 ka)、斜率(45~39 ka)、短偏心率(130~100 ka)和长偏心率(450~390 ka)等气候旋回周期信号

(3)根据PDA分析结果,松辽盆地在白垩纪早期表现出以偏心率和岁差信号(特别是偏心率信号)为主,斜率信号非常弱的特点,在轨道时间尺度上

与全球气候变化具有一致性。

## References

- Arnaud F, Révillon S, Debret M, et al., 2012. Lake Bourget regional erosion patterns reconstruction reveals Holocene NW European Alps soil evolution and paleohydrology[J]. *Quaternary Science Reviews*, 51: 81–92.
- Bouhila S, Galbrun B, Kenneth G, et al., 2011. On the origin of Cenozoic and Mesozoic “third-order” eustatic sequences[J]. *Earth Science Reviews*, 109: 94–112.
- Chen PJ, 1987. Cretaceous paleogeography of China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 59: 49–56.
- Croudace I W, Rothwell R G, 2015. *Micro-XRF Studies of Sediment Cores: Applications of a non-destructive tool for the environmental sciences*[M]. Netherlands: Springer: 455.
- Feng Z Q, Jia C Z, Xie X N, et al., 2010. Tectonostratigraphic units and stratigraphic sequences of the nonmarine Songliao basin, northeast China[J]. *Basin Research*, 22 (1): 79–95.
- Fernandez M, Björck S, Wohlfarth B, et al., 2013. Diatom assemblage changes in lacustrine sediments from Isla de los Estados, southernmost South America, in response to shifts in the southwesterly wind belt during the last deglaciation[J]. *Journal of Paleolimnology*, 50 (4): 433–446.
- Foster G L, Royer D L, Lunt D J, 2017. Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years[J]. *Nature Communications*, 8: 14845.
- Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J, 1976. Variations in the Earth's orbit: Pacemaker of the Ice Ages[J]. *Science*, 194: 1121–1132.
- Huang H, Gao Y, Ma C, et al., 2021. Organic carbon burial is paced by a ~173-ka obliquity cycle in the middle to high latitudes[J]. *Science advances*, 7 (28): eabf9489.
- Jin Z D, Zhang E L, 2002. Paleoclimate implication of Rb/Sr ratios from lake sediments[J]. *Science Technology and Engineering*, 2: 20–22.
- Kodama K P, Hinnov L A, 2014. *Rock magnetic cyclostratigraphy*[M]. Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.
- Larson R L, 1991. Latest pulse of Earth: Evidence for a mid Cretaceous superplume[J]. *Geology*, 19 (6): 547–550.
- 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: 261–285.
- Laurin J, Meyers S R, Uličný D, et al., 2015. Axial obliquity control on the greenhouse carbon budget through middle- to high-latitude reservoirs[J]. *Paleoceanography*, 30: 133–149.
- Li M S, Hinnov L A, Kump L R, 2019a. Acycle: Time-series analysis software for paleoclimate research and education[J]. *Computers & Geosciences*, 127: 12–22.
- Li M S, Huang C J, Ogg J, et al., 2019b. Paleoclimate proxies for cyclostratigraphy: Comparative analysis using a Lower Triassic marine section in South China[J]. *Earth-Science Reviews*, 189: 125–146.
- Li M S, Huang C J, Hinnov L, et al., 2016. Obliquity-forced climate

- during the Early Triassic hothouse in China[J]. *Geology*, 44 (8) : 623 – 626.
- Li X, Huang Y J, Zhang Z F, et al., 2022a. Chemical weathering characteristics of the Late Cretaceous Nenjiang Formation from the Songliao Basin (Northeastern China) reveal prominent Milankovitch band variations[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 601: 111130.
- Li X, Huang Y J, Zhang Z F, et al., 2022b. Orbitally forced chemical weathering in the Late Cretaceous northeastern China: Implications for paleoclimate change[J]. *Global and Planetary Change*, 218: 103982.
- Ma K Y, Li R C, Gong Y M, 2016. Chemostratigraphy and cyclostratigraphy of the Ordovician Liangjiashan section from Shimenzhai of Qinhuangdao in North China[J]. *Earth Science Frontiers*, 23 (6) : 268–286 (in Chinese with English abstract).
- Muhs D R, Bettis E A, Been J, et al., 2001. Impact of climate and parent material on chemical weathering in loess-derived soils of the Mississippi River valley[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 65 (6) : 1761 – 1777.
- Pang J L, Huang C C, Zhang Z P, 2001. Rb, Sr elements and high resolution climatic records in the loess-paleosol profile at Qishan, Shanxi[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19: 637 – 641.
- Gao H, Wang P J, Gao Y F, et al., 2023. The Upper-Lower Cretaceous boundary in the southern Songliao Basin: A case study of ICDP borehole SK-3[J]. *Earth Science Frontiers*, 30 (3) : 425 – 440 (in Chinese with English abstract).
- Qu X J, Gao Y F, Lin Z C, et al., 2021. Comparative characteristics of Jurassic/Cretaceous boundary in Songliao Basin and its surrounding areas[J]. *Earth Science Frontiers*, 28 (4) : 299 – 315 (in Chinese with English abstract).
- Thomson D J, 1982. Spectrum estimation and harmonic analysis[J]. *Proceedings of the IEEE*, 70 (9) : 1055 – 1096.
- Unkel I, Fernandez M, Björck S, et al., 2010. Records of environmental changes during the Holocene from Isla de los Estados (54.4°S), southeastern Tierra del Fuego[J]. *Global and Planetary Change*, 74 (3) : 99 – 113.
- Wang C S, Scott R W, Wan X Q, 2013a. Late Cretaceous climate changes recorded in Eastern Asian lacustrine deposits and North American Epiherc sea strata[J]. *Earth-Science Reviews*, 126: 275 – 299.
- Wang C S, Feng Z Q, Zhang L M, et al., 2013b. Cretaceous paleogeography and paleoclimate and the setting of SK1 borehole sites in Songliao Basin, northeast China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385: 17 – 30.
- Wang P J, Mattern F, Frank D, et al., 2016. Tectonics and cycle system of the Cretaceous Songliao Basin: An inverted active continental margin basin[J]. *Earth-Science Reviews*, 159 (1) : 82 – 102.
- Wang P J, Chen S M, 2015. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, northeast China[J]. *AAPG Bulletin*, 99 (3) : 499 – 523.
- Wendler J E, Wendler I, Vogt C, et al., 2016. Link between cyclic eustatic sea-level change and continental weathering: Evidence for aquifer-eustasy in the Cretaceous[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 441: 430 – 437.
- Ruddiman W F, *Earth's climate: Past and future*[M]. 3rd ed. Macmillan: 1–464.
- Wu H C, Zhang S H, Hinnov L A, et al., 2014. Cyclostratigraphy and orbital tuning of the terrestrial upper Santonian–Lower Danian in Songliao Basin, northeastern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 407: 82 – 95.
- Wu H C, Zhang S H, Jiang G Q, et al., 2013. Astrochronology of the Early Turonian–Early Campanian terrestrial succession in the Songliao Basin, northeastern China and its implication for long-period behavior of the Solar System[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385: 55 – 70.
- Xi D P, Sun L X, Qin Z H, et al., 2021. Lithostratigraphic subdivision and correlation of the Cretaceous in China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 45 (3) : 375 – 401 (in Chinese with English abstract).
- Xu Z Q, Yang W C, Yang J S, et al., 2016. 15 Years of hardship and struggle history and the prospects for the future of the Chinese Continental Scientific Drilling program (CCSD) : In memory of the 15 year anniversary of CCSD and 20 year anniversary of ICDP[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90 (9) : 2109–2122 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 马坤元, 李若琛, 龚一鸣, 2016. 秦皇岛石门寨亮甲山奥陶系剖面化学地层和旋回地层研究[J]. *地学前缘*, 23 (6) : 268–286.
- 高航, 王璞珺, 高有峰, 等, 2023. 松辽盆地南部上、下白垩统界线研究: 以松辽盆地国际大陆科学钻探松科 3 井为例[J]. *地学前缘*, 30 (3) : 425 – 440.
- 瞿雪姣, 高有峰, 林志成, 等, 2021. 松辽盆地及周缘地区侏罗系/白垩系界线区域对比特征探讨[J]. *地学前缘*, 28 (4) : 299 – 315.
- 席党鹏, 孙立新, 覃祚焕, 等, 2021. 中国白垩纪岩石地层划分和对比[J]. *地层学杂志*, 45 (3) : 375 – 401.
- 许志琴, 杨文采, 杨经绥, 等, 2016. 中国大陆科学钻探的过去、现在和未来——纪念中国大陆科学钻探实施 15 周年、国际大陆科学钻探委员会成立 20 周年[J]. *地质学报*, 90 (9) : 2109–2122.