

# 基于米氏旋回的页岩高频层序划分与页岩有机质富集模式

## —以松辽盆地梨树断陷北斜坡营城组为例

陈永进\*, 李友

中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

\* 通信作者, 2001011441@cugb.edu.cn

收稿日期: 2024-05-09; 修回日期: 2024-06-20

国家科技重大专项“不同类型页岩气生成机理及富集规律研究”(2016ZX05034-001)资助

**摘要** 松辽盆地梨树断陷营城组页岩气具有巨大的勘探开发前景。与此同时, 针对页岩层段的高频层序划分逐渐成为研究热点。但传统层序地层学难以针对页岩层系划分层序, 页岩层系的有机质富集模式认识不清, 对页岩油气的勘探开发造成阻碍。利用旋回地层学方法可在页岩层系中划分高频层序, 还可基于米氏旋回探究页岩有机质的富集模式, 是预测甜点层的有利手段。通过对研究区营城组的自然伽马数据进行天文旋回分析, 得出以下结论: (1)SN65 井营城组较好保存了米氏旋回信号, 并以长、短偏心率作为四级、五级层序的参考曲线, 划分了 14 个四级层序与 51 个五级层序, 建立了研究区高精度等时地层格架。(2)梨树断陷北斜坡营城组页岩有机质富集受控于天文旋回, 且二者互为反相位, 即长偏心率高值时期, 气候暖湿, 对应总有机碳(TOC)低值; 长偏心率低值, 气候干冷, 对应 TOC 高值。(3)建立暖湿与干冷两种页岩沉积模式。通过引入温跃层溶解氧最小值段(MOM)的概念, 证明干冷环境有利于页岩有机质富集。(4)以长偏心率旋回曲线的半幅点为界, 划分 4 个富有机质页岩层段和 3 个含有机质页岩层段。优质页岩层段发育于各个层序的顶部和底部, 而不是最大湖泛面。浅水环境对富有机质页岩发育有利。研究成果不仅为松辽盆地梨树断陷页岩气甜点预测提供理论支撑, 也为其他湖相盆地的有机质富集模式提供参考依据。

**关键词** 梨树断陷; 营城组; 米氏旋回; 高频层序; 有机质富集

中图分类号: P618.13; P536

## Division of high-frequency shale sequences and organic matter enrichment patterns in shales based on Milankovitch cycles: A case study of the Yingcheng Formation in the Northern Slope of the Lishu Fault Depression, Songliao Basin

CHEN Yongjin, LI You

School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

引用格式: 陈永进, 李友. 基于米氏旋回的页岩高频层序划分与页岩有机质富集模式—以松辽盆地梨树断陷北斜坡营城组为例. 石油科学通报, 2024, 04: 535-548

CHEN Yongjin, LI You. Division of high-frequency shale sequences and organic matter enrichment patterns in shales based on Milankovitch cycles: A case study of the Yingcheng Formation in the Northern Slope of the Lishu Fault Depression, Songliao Basin. Petroleum Science Bulletin, 2024, 04: 535-548. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.04.040

Received: 2024-05-09; Revised: 2024-06-20

**Abstract** The Early Cretaceous Yingcheng Formation shale gas in the Lishu Fault Depression of the Songliao Basin presents immense prospects for exploration and development. Concurrently, the division of high-frequency sequences within shale intervals has gradually become a research focus. However, traditional sequence stratigraphy faces challenges in the precise delineation of sequences within the shale series, while the understanding of organic matter enrichment patterns within the shale series remains unclear, hindering the exploration and development of shale oil and gas. The utilization of cyclostratigraphy methods allows for the subdivision of high-frequency sequences within the shale series, and further, it provides a beneficial means to explore the enrichment patterns of organic matter in shale based on Milankovitch cycles, aiding in the prediction of "sweet spots" within the layers. Through astronomical cycle analysis of natural gamma-ray data from the research area in the Yingcheng Formation, the following conclusions have been drawn: (1) Well SN65 effectively preserves the signals of Milankovitch cycles within the Yingcheng Formation. Long and short eccentricities serve as reference curves for the fourth and fifth-order sequences, respectively, delineating 14 fourth-order sequences and 51 fifth-order sequences, thus establishing a high-precision isochronous stratigraphic framework for the study area. (2) The organic matter enrichment of the shale within the Yingcheng Formation on the northern slope of the Lishu Fault Depression is controlled by astronomical cycles, exhibiting an antiphase relationship. During periods of high long eccentricity, the climate was warm and humid, corresponding to low Total Organic Carbon (TOC) values; conversely, during periods of low long eccentricity, the climate was cold and dry, corresponding to high TOC values. (3) Two shale sedimentation models have been established: warm-humid and cold-dry. Through the introduction of the concept of the metalimnetic oxygen minimum (MOM), it has been demonstrated that cold-dry environments are conducive to the enrichment of organic matter in shale. (4) The data were divided into 4 organic-rich shale intervals and 3 organic matter-bearing shale intervals based on the half-amplitude points of the long eccentricity cycle curve. High-quality shale intervals develop at the tops and bottoms of various sequences rather than at the maximum flooding surface. Shallow water environments are conducive to the development of organic-rich shale. These research findings not only provide theoretical support for predicting "sweet spots" of shale gas within the Yingcheng Formation in the Lishu Fault Depression of the Songliao Basin but also serve as a reference for the organic matter enrichment patterns in other lacustrine basins, holding significant implications for the evaluation of shale oil and gas exploration selection.

**Keywords** Lishu Fault Depression; Yingcheng Formation; Milankovitch cycles; high-frequency sequence; organic matter enrichment

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.04.040

## 0 引言

层序地层学研究经过近 50 年的发展,目前在沉积相分析、油气储层分析、烃源岩评价等方面得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。随着页岩油气的勘探开发工作不断推进,三级层序分析结果往往难以指导页岩油气的精细勘探,高频层序划分工作的重要性正在显现。在传统层序地层学中,一套厚层页岩往往被划分为一个海侵体系域进行分析,内部准层序或准层序组的界限不明显,在页岩中准确识别层序与准层序界面具有一定难度。因此传统层序地层学研究方法难以得到应用,限制了页岩等时对比的精度与准确性<sup>[3-5]</sup>。近年来,以旋回地层学为理论基础的高频层序地层划分研究,通过识别地层中的米兰科维奇旋回信号,对页岩进行高频层序划分。利用米氏旋回的时间意义,实现了层序划分工作的量化<sup>[6-7]</sup>。

在我国,关于湖相地层的旋回地层学研究,主要聚焦于非常规油气层段。如 Wu 等<sup>[8]</sup>在松辽盆地白垩系的青山口组与嫩江组建立了天文年代标尺,揭示了

受天文旋回控制的沉积作用,证明了天文旋回在地层定年和高频层序的划分工作方面可以提供一定的参考作用;陈果<sup>[9]</sup>针对鄂尔多斯三叠系长 7 段细粒烃源岩开展了旋回地层学研究,获得了长 7 段各个亚段的沉积时限,并建立了有机质富集主控模式;王淳等<sup>[10]</sup>针对东营凹陷渤海湾盆地古近系沙三下-沙四上亚段湖相细粒沉积岩进行旋回地层学分析,建立起绝对天文年代标尺,对研究区域进行四级和五级层序的划分,并建立了有机质富集模式。前人在梨树断陷营城组的旋回地层学研究较少。

梨树断陷具有较大的勘探开发潜力,是中石化东北油气分公司的重点开发区块之一<sup>[11]</sup>。仅在“十三五”期间,中石油、中石化等集团在梨树断陷页岩气开采方面取得了重大成果。在梨树断陷钻探吉梨页油 1 井,发现有 51 m 巨厚含气页岩层,并获得高产页岩气流,日产量达到了 7.6 万 m<sup>3</sup><sup>[12]</sup>。其中营城组的页岩气形成条件较好。熊壮等<sup>[13]</sup>研究发现该层段的页岩气形成条件较好,泥页岩厚度大,有机质含量丰富,发育有优质泥质烃源岩,具备生成页岩气资源的良好条件,具

有良好的勘探开发潜力；陈岑等<sup>[14]</sup>认为研究区营一段的有机质类型以II2型和III型干酪根为主，并且具有较高的成熟度，是页岩气成藏的良好地化条件，具有充分的页岩气勘探开发潜力。

前人针对梨树断陷营城组进行过大量层序地层学研究。关于三级层序和四级层序的划分结论不一。郝悦娟<sup>[15]</sup>将梨树断陷营城组划分为2个三级层序和7个四级层序。部分区域由于剥蚀原因，层序发育不完整；单敬福等<sup>[16]</sup>、陈贤良等<sup>[17]</sup>划分了2个三级层序，并将每个层序进一步划分出3个体系域；蔡来星等<sup>[18]</sup>则划分了4个三级层序，层序界面与营城组中四个段的界面互相对应，其中营四段由于剥蚀严重，层序发育不完整。但是总的来说，前人针对梨树断陷营城组的层序地层分析，主要聚焦于3级层序界面的识别、三级层序及体系域的划分与对比<sup>[16-17]</sup>。针对四级及以上的高频层序划分对比，目前涉及较少；页岩层系的有机质富集模式认识不清，阻碍了页岩油气的勘探开发。

针对上述问题，本文以松辽盆地梨树断陷北斜坡为研究区块，利用自然伽马曲线识别研究区内营城组的天文旋回；将地球轨道参数与高频层序相对应，实现研究区页岩的高频层序地层定量划分与高精度等时对比。最后在高精度层序地层格架下，探究天文旋回对页岩有机质富集的控制。研究成果可以克服页岩层系内部难以划分高频层序的困难，实现时间尺度的高频层序定量划分，同时对研究区域进行甜点层段预测，在指导研究区的页岩气勘探开发的同时，也为其他湖相盆地的页岩气开发提供参考依据<sup>[19]</sup>。

## 1 地质概况

梨树断陷位于松辽盆地的东南隆起区，在地理位置上位于吉林省长春市和四平市，属于断拗复合型盆地。梨树断陷共有六个构造单元。分别为北部斜坡带、东部斜坡带、中央构造带、桑树台洼陷带、苏家屯次洼和双龙次洼带(图1)。在地层上，梨树断陷地层由西向东逐层超覆。向北地层迅速减薄；在构造上，梨树断陷自晚侏罗世以来发生了多起构造运动。包括断陷期(火石岭期-登娄库期)、拗陷期(泉头期-嫩江期)和构造反转期(嫩江晚期)，并且发育了断陷、拗陷共两套断裂系统<sup>[20-21]</sup>。

本文主要研究对象是上白垩统营城组的页岩，也是页岩气勘探的主力层段之一。营城组属于断陷湖盆地层，发育受西部桑树台大断裂的控制。与下伏沙河子组呈整合接触，与上覆登娄库组呈假整合接触。分

布主要受到桑树台边界的控制，向北部、东部和南部为超覆减薄沉积，分布范围广泛<sup>[16]</sup>。前人将营城组分为四段，各段的厚度在各个区域内差异明显。其中营四段最薄。从营一段到营四段，岩性从泥岩逐渐变为粉砂质泥岩和泥质粉砂岩。纵向上呈现出粒度变粗的特点，为典型的反旋回沉积。营城组沉积期，梨树断陷的沉降速率较大，整体上形成了一个欠补偿的深湖、半深湖的沉积环境<sup>[22]</sup>。

## 2 天文周期识别的原理与方法

### 2.1 理论原理

米兰科维奇于1941年提出米兰科维奇旋回理论，该理论旨在将地球轨道参数与地球气候的变化建立联系<sup>[23]</sup>。对气候变化敏感的地层可以记录地球轨道参数的变化规律。利用滤波等数学方法，可以将地球轨道参数的变化规律提取出来。由于这种变化规律通常是周期性、旋回性的，因此称这种变化为米兰科维奇旋回(简称米氏旋回)<sup>[24]</sup>。地球轨道参数包括3个要素：偏心率、斜率与岁差。偏心率的变化周期可以分为405 kyr的长偏心率周期( $E$ )，以及平均100 kyr的短偏心率周期( $e$ )。其中405 kyr的长偏心率周期在地质历史时期较为稳定可靠，因此405 kyr偏心率周期常被称为一座精确的“沉积物钟”或地质计时的“钟摆”<sup>[25-26]</sup>；斜率周期( $O$ )可以分为54 kyr、41 kyr和39 kyr等，平均为40 kyr；岁差周期( $P$ )包含24 kyr、22 kyr和19 kyr等，平均为20 kyr。在地质历史时期，由于地月潮汐作用，以及星球间万有引力的摩擦作用，斜率和岁差的周期都不断增大<sup>[27]</sup>。

### 2.2 技术方法

古气候替代性指标是在地质历史时期，对古气候变化响应敏感，并可以对变化情况起到指示作用的指标。利用上述指标对地层进行旋回地层学分析，可揭示沉积时期的古气候变化规律。常见的古气候替代性指标较多，由于自然伽马测井(GR)数据具有获取较为容易、连续性好、分辨率高(数据间隔为0.125 m)、对古气候变化较为敏感等优点，是旋回地层学分析中较为常用的替代性指标，因此本次研究使用研究区域营城组的自然伽马测井数据进行旋回地层学分析。利用Acycle软件<sup>[28]</sup>对研究区内对应层段的自然伽马测井数据进行旋回地层学分析。分析流程可总结为如下4个步骤：(1)数据预处理：将获取到的原始数据进行排序、去极值、删除空值等操作，并进行去趋势化，以

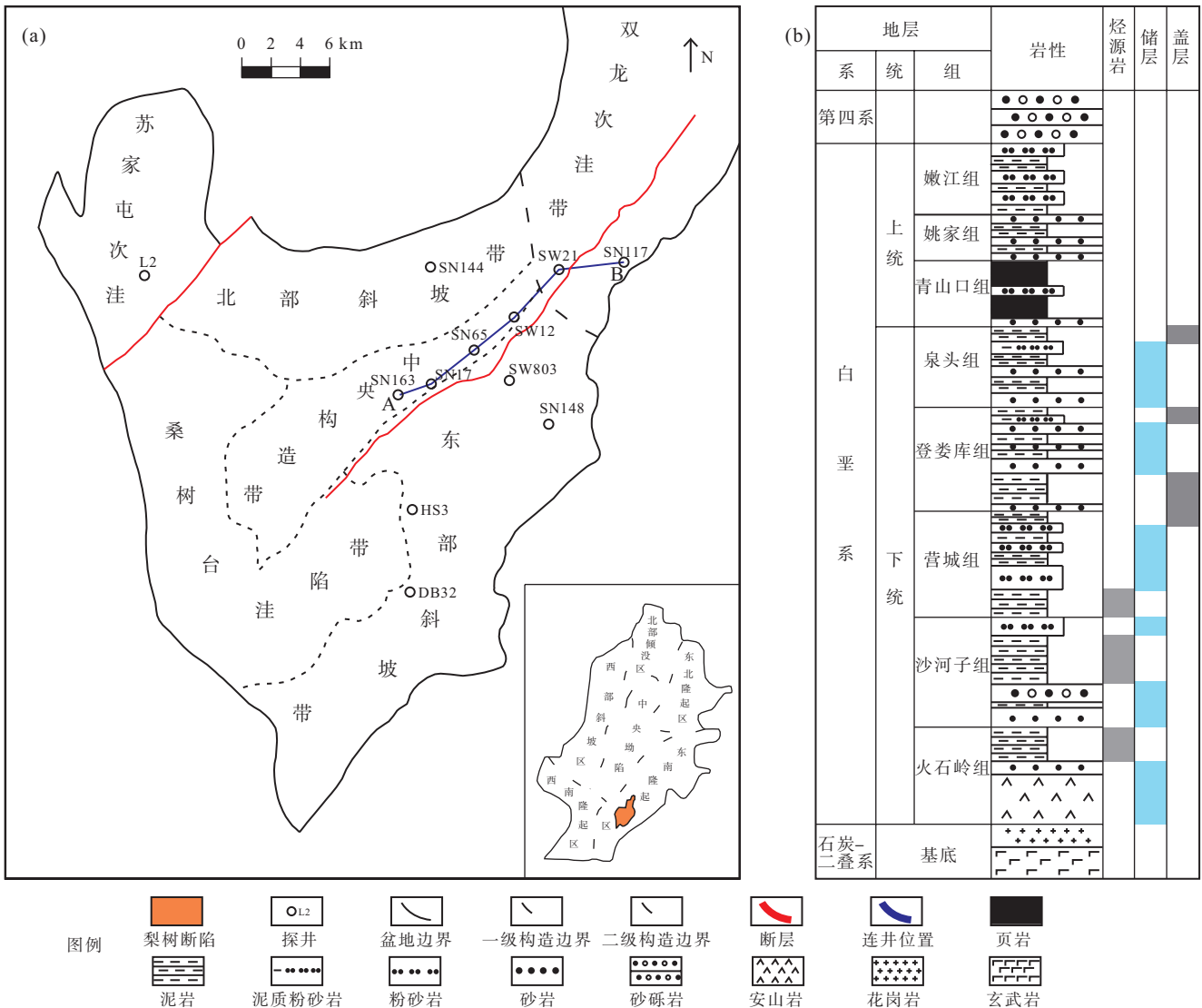


图1 梨树断陷构造地层柱状图 (a) 梨树断陷构造单元图; (b) 梨树断陷综合地层柱状图 (据文献<sup>[21]</sup>改编)  
 Fig. 1 Structural stratigraphic histogram of Lishu Fault Depression (a) structural geological map of Lishu Fault Depression; (b) comprehensive stratigraphic histogram of Lishu Fault Depression (modified from references<sup>[21]</sup>)

去除地层中包含的与天文旋回无关的噪音数据; (2) 频谱分析: 对研究序列进行傅里叶分析识别谱峰, 以此得到目标序列中含有的周期数量与分布频率。演化频谱还可对一定深度内旋回信号的变化程度进行分析; (3) 滤波分析: 将单一的目标信号从原始序列中进行分离。在旋回地层学研究中, 较常用的是高斯带通滤波; (4) 天文调谐: 识别并分离出米氏旋回信号后, 利用米氏旋回信号建立年龄模型, 并调谐到目标理论曲线上, 将原始数据序列由深度域调谐至时间域。

### 3 旋回地层学分析

本次研究中针对研究区中部分井位进行旋回地层学分析。接下来以示意井SN65井为例, 对旋回地层

学的分析流程进行描述。

#### 3.1 深度域频谱分析

对SN65井营城组的自然伽马曲线数据预处理后, 进行频谱分析与演化频谱分析。由于营城组地层厚度过大, 频谱分析会获取到多个不同的峰值, 增加频谱分析的多解性, 对识别米兰科维奇旋回信号产生不利影响。因此将SN65井纵向上分为两部分, 分别为营一、二段(1379~1592 m)和营三、四段(1256~1379 m), 并对这两部分分别进行频谱分析。在营一、二段, 高于99%置信度的谱峰对应的旋回厚度分别为33.30 m、24.84 m、2.73 m; 高于95%置信度的谱峰对应的旋回厚度分别为6.55 m、5.21 m、4.33 m、2.22 m、1.90 m、1.56 m、1.25 m、1.04 m。总体上可以划分为

33.30~20.50 m、6.55~4.43 m、3.49~2.22 m、1.90~1.04 m 四个频带。其中 24.84 m、6.55 m、2.73 m、1.25 m 旋回厚度之比为 24.84:6.55:2.73:1.25。在营三、四段，高于 95% 置信度的谱峰对应的旋回厚度分别为 25.99 m、21.89 m、17.69 m、5.89 m、5.30 m、4.92 m、2.20 m；高于 90% 置信度的谱峰对应的旋回厚度分别为 2.58 m、2.00 m、1.28 m、1.20 m、1.00 m。总体上可以划分为 25.99~17.69 m、5.89~4.92 m、2.58~2.00 m、1.28~1.00 m 四个频带。其中 21.89 m、5.89 m、2.20 m、1.20 m 旋回厚度之比为 21.89:5.89:2.2:1.2。上述两个旋回厚度之比均与 20:5:2:1 近似，并满足误差小于 10% 的要求<sup>[29]</sup>。因此可初步认定这套地层中存在米兰科维奇旋回信号，并且这组旋回厚度分别受到长偏心率 405 kyr、短偏心率 100 kyr、斜率 40 kyr、岁差 20 kyr 的地球轨道参数的控制。通过长偏心率周期控制的旋回厚度/405 kyr 进行估算，初步得到营一、二段的地层沉积速率为 6.13 cm/kyr，营三、四段的地层沉积速率为 5.40 cm/kyr。营城组频谱分析结果如图 2 所示，不同颜色代表旋回信号的不同强度，颜色越红的地方，对应上图的谱峰高度越高，米氏旋回信号的强度越强。结合演化频谱分析结果，各个天文轨道周期对应的旋回谱峰均分布于上述划分的频带中，且长偏心率旋回信号在地层

中稳定、高能存在。长偏心率 and 短偏心率旋回谱峰的信号较强，斜率和岁差旋回谱峰的信号较弱(图 2)。

相关系数分析(COCO)是天文学分析中使用较多的检验方法。该方法通过相关系数检验、零假设的显著性检验与蒙特卡洛模拟，获取到地层中受米兰科维奇旋回控制的最优沉积速率<sup>[30]</sup>。利用 COCO 可以约束旋回厚度，对频谱分析的结果进行检验，从而减少频谱分析过程中的主观因素。本文针对营一、二段、营三、四段地层的去趋势自然伽马数据，利用 COCO 进行天文检验。检验结果显示，营一、二段地层中，最优沉积速率为 6.15 cm/kyr。在该沉积速率下，相关系数值最高，且零假设置信度远低于  $10^{-2}$ ，表示该沉积速率受天文旋回调控的置信度远高于 99%。匹配的轨道参数均为 7，表明了该段地层较好地保留了米兰科维奇信号。营三、四段地层中存在多个峰值，但由于相关系数较低(0.2 左右)，或匹配的轨道参数数量不足，在本次研究中不作考虑。该段地层最优沉积速率为 5.30 cm/kyr。营一、二段的最优沉积速率 6.15 cm/kyr 与前文预估的沉积速率 6.13 cm/kyr 较为接近；营三、四段的最优沉积速率 5.30 cm/kyr 与前文预估的沉积速率 5.40 cm/kyr 较为接近。二者相互印证，可证明频谱分析结果的正确性(图 3)。

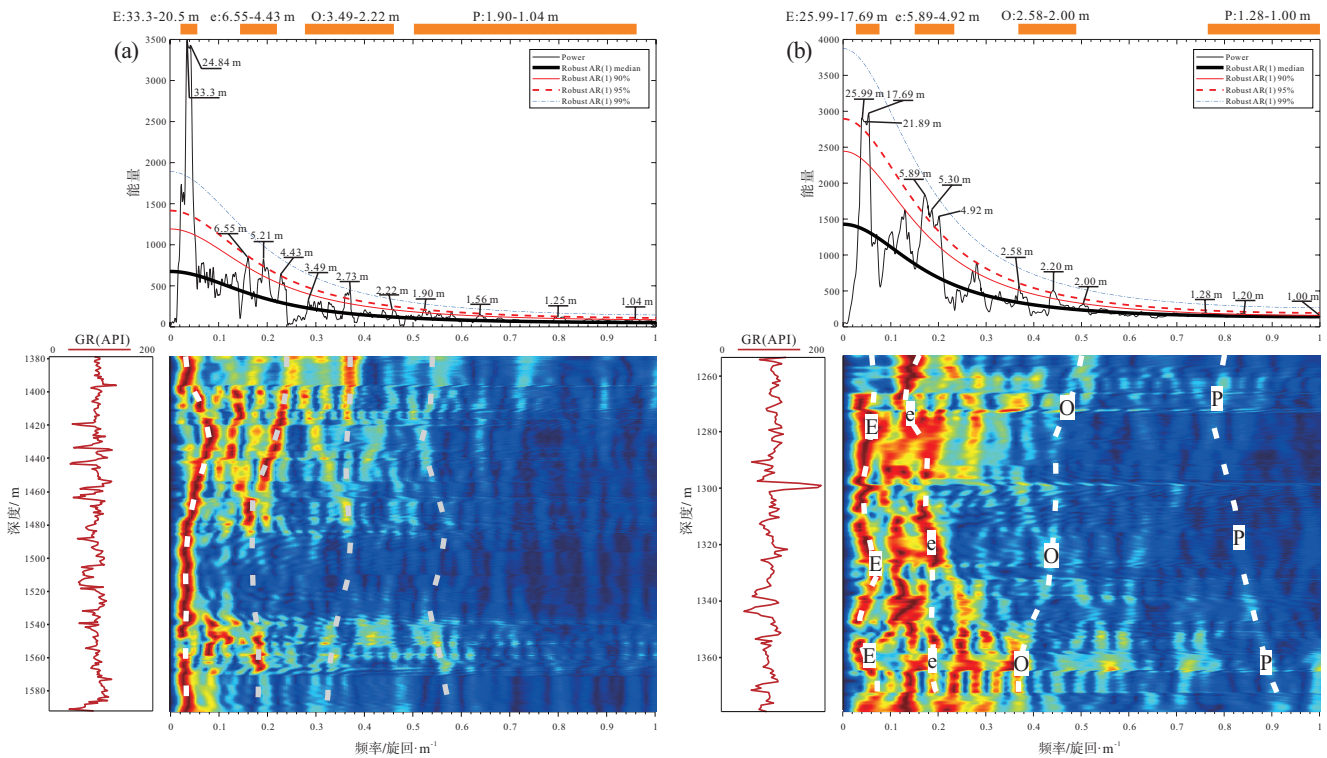


图 2 SN65 井营城组频谱分析 (a) SN65 井营城组一、二段频谱分析；(b) SN65 井营城组三、四段频谱分析  
 Fig. 2 Spectrum analysis of Yingcheng Formation of Well SN65 (a) spectrum analysis of Section 1 and Section 2 of Yingcheng Formation of Well SN65; (b) spectrum analysis of Section 3 and Section 4 of Yingcheng Formation of Well SN65

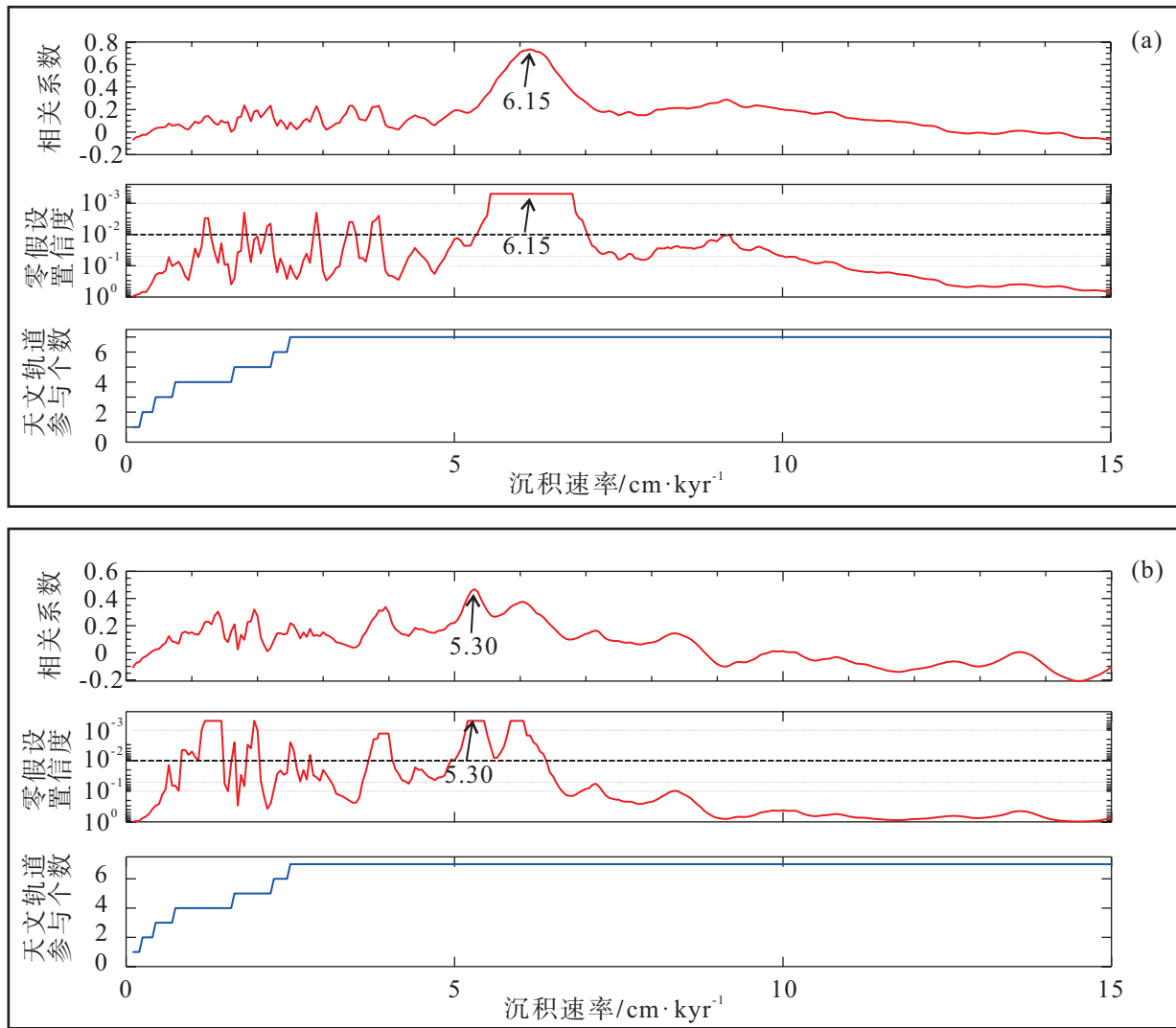


图3 SN65井营城组自然伽马数据相关系数(COCO)分析(a) SN65井营一、二段自然伽马数据相关系数分析;(b) SN65井营三、四段自然伽马数据相关系数分析

Fig. 3 Correlation coefficient (COCO) analysis of 自然伽马 data of the Yingcheng Formation of well SN65 (a) correlation coefficient analysis of section 1 and section 2 of Yingcheng Formation of well SN65; (b) correlation coefficient analysis of section 3 and section 4 of Yingcheng Formation of well SN65

### 3.2 滤波与天文调谐

基于频谱分析结果,利用高斯带通滤波,对特定频率的信号进行滤波提取。将代表营一、二段长偏心率周期(405 kyr)的沉积旋回提取,旋回厚度为24.84 m;将短偏心率周期(100 kyr)的沉积旋回提取,旋回厚度为6.55 m。滤波结果显示营一、二段记录了8个长偏心率周期和31个短偏心率周期。将代表营三、四段长偏心率周期(405 kyr)的沉积旋回提取,旋回厚度为21.89 m;将短偏心率周期(100 kyr)的沉积旋回提取,旋回厚度为5.89 m。滤波结果显示营三、四段记录了6个长偏心率周期和20个短偏心率周期。上述滤波结果中,营一、二段每个长偏心率周期约包含

4个短偏心率周期,表明该段的长偏心率周期信号较强;营三、四段每个长偏心率周期约包含3个短偏心率周期,表明该段的长偏心率信号较弱,可能与当时沉积环境不稳定有关(图4)。

## 4 结果与讨论

### 4.1 高频层序划分与地层对比

#### 4.1.1 SN65井高频层序划分

在页岩油气勘探开发工作逐渐精细化的背景下,高频层序划分是指导页岩油气精细勘探的重要理论支撑。传统的层序地层划分工作主要依靠识别地震资料中的反射界面来进行。但泥页岩中的反射界面不明显,

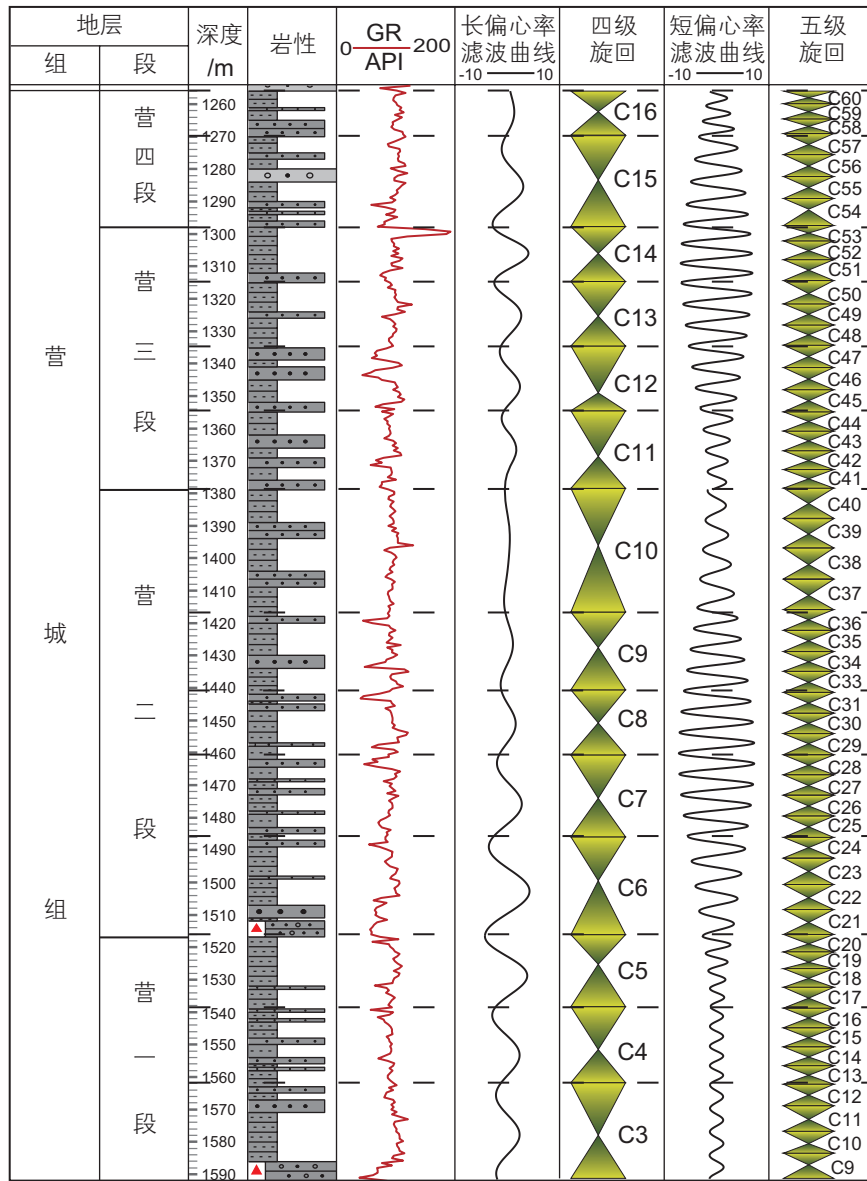


图 4 SN65 井营城组高频层序定量划分

Fig. 4 Quantitative classification of high-frequency sequences in Yingcheng Formation of Well SN65

难以通过上述方法进行泥页岩的高频层序划分，限制了泥页岩中高频层序划分的精度与准确性。目前针对泥页岩高频层序划分有以下几种方案：(1)GRP法：由于自然伽马曲线对水平面的升降变化具有良好响应，因此可通过识别自然伽马曲线的突变来划分页岩层序<sup>[3]</sup>。(2)INPEFA法，在最大熵谱分析法的基础之上，Nio等提出对自然伽马序列进行预测误差滤波分析，得到INPEFA趋势线。通过趋势线的拐点划分层序<sup>[31]</sup>。(3)元素地球化学分析法，对各类岩心进行高密度的元素地球化学分析。通过分析各种元素比值的变化规律划分层序<sup>[32]</sup>。(4)米兰科维奇旋回分析法，通过对古气候替代指标进行分析，识别米氏旋回。利用米氏旋回

的时间意义进行高频层序划分<sup>[33]</sup>。

石巨业等<sup>[34]</sup>将米氏旋回周期与高频层序进行了联系，并且与高分辨率层序地层学中基准面的概念进行结合，在每个周期的内部，利用旋回曲线的波峰波谷划分上升半旋回与下降半旋回。三级层序一般受构造因素调控，对应长期基准面旋回，持续时间为1~10Ma；四级层序受长偏心率周期调控，对应中期基准面旋回，持续时间为405 kyr；五级层序受短偏心率周期调控，对应短期基准面旋回，持续时间约为100 kyr；六级层序受斜率周期调控，对应超短期基准面旋回，持续时间约为40 kyr。

由于利用米氏旋回划分的层序具有严格的等时性，

因此可以克服传统层序划分中主观性较强的弊端<sup>[35]</sup>。利用米氏旋回在营城组共划分出 14 个四级旋回和 51 个五级旋回。每个旋回均以滤波曲线的波谷为界，指示为层序界面；每个旋回内部以波峰为界，划分上升半旋回与下降半旋回，指示为湖泛面(图 4)。

#### 4.1.2 偏心率尺度地层对比

选取梨树断陷北斜坡 SN65 井等六口井的 405 kyr 长偏心率周期(四级旋回)和 100 kyr 短偏心率周期(五级旋回)，借助高分辨率层序地层学理论，将每个旋回划分为基准面上升半旋回和基准面下降半旋回，并在此基础上进行区域性的等时地层对比，同时建立梨树断陷北斜坡的层序地层格架。本次研究依据前人研究结果<sup>[15]</sup>，将营城组划分为 2 个三级层序，4 个半旋回。SQ1 上升半旋回包含营城组一段；SQ1 下降半旋回包含营城组二段下部；SQ2 上升半旋回包含营城组二段上部与营城组三段；SQ2 上升半旋回包含营城组四段(图 5)。

连井结果显示，梨树断陷北斜坡不同区域内，层序的数量均有不同，在连井区域内分布不稳定。其中 SN163 井包含 16 个四级旋回、SN17 井包含 15 个四级

旋回；SN65 井包含 14 个四级旋回；SW12 井、SW21 井和 SN117 井由于位于构造高点位置，在营城组沉积时期遭受较强的剥蚀作用，均出现了四级旋回保存不完整的现象。上述分析结果可知，受研究区小宽断裂带的控制，梨树断陷北斜坡的构造情况复杂，进而导致连井分析结果的复杂性，总体上呈现出以下规律：西部剥蚀作用较弱，东部剥蚀作用较强；西部层序保存较完好，东部层序缺失较多。由于无法确定研究区的剥蚀厚度，因此只能依据现有地层厚度、岩心资料、测井资料等，结合频谱分析和滤波结果，确定旋回厚度，并进行连井对比。

#### 4.2 米氏旋回对页岩有机质富集的控制规律

米氏旋回通过对地球气候调控，从而对有机质富集起到控制作用。王淳等<sup>[10]</sup>、周靖皓等<sup>[36]</sup>利用自然伽马曲线进行天文旋回研究。研究指出，偏心率驱动气候变化。通过自然伽马曲线滤波得到的偏心率曲线，其高值(低值)与气候的暖湿(干冷)具有良好的响应关系。当偏心率处于极大值附近，季节性变强，反映古

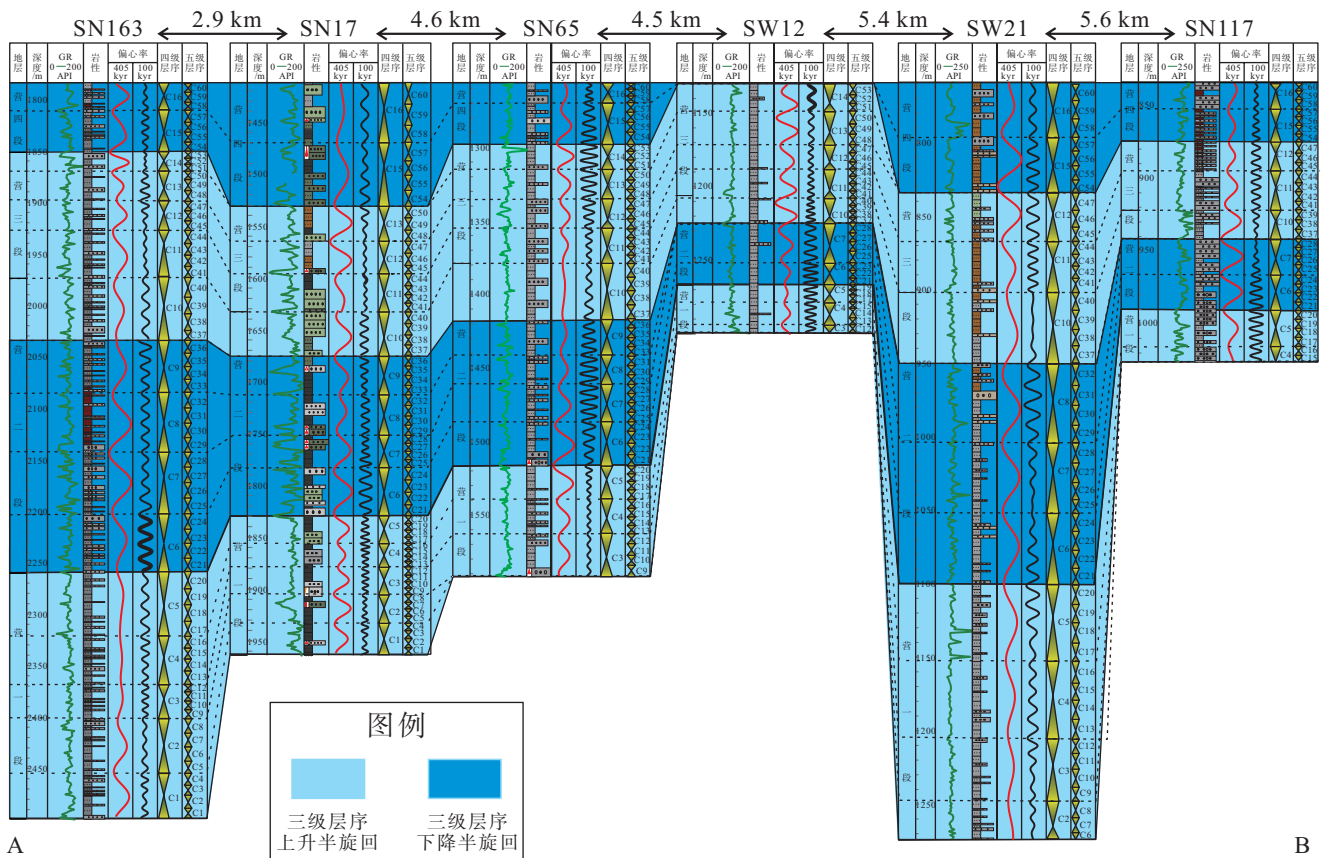


图 5 梨树断陷北斜坡营城组偏心率尺度连井对比(剖面位置见图 1a)

Fig. 5 Eccentricity cycles correlation of the Yingcheng Formation in the North slope of Lishu Fault Depression (the section position is shown in Fig.1a)



气候暖湿；当偏心率处于极小值附近，季节性变弱，反映古气候干冷。同时古气候变化也影响页岩的有机质富集。同时张瑞等<sup>[37]</sup>利用Rb/Sr数据进行米氏旋回分析，同样得到了上述结论：偏心率极大值附近时，古气候暖湿；偏心率极小值附近时，古气候干冷。

毛小平等<sup>[38-39]</sup>针对四川盆地五峰组-龙马溪组、松辽盆地长岭断陷龙凤山地区沙河子组等地层进行研究。认为深湖-半深湖等深水环境不利于有机质的富集，层序地层学中最大湖泛面的密集段，有机质平均含量普遍偏低。有机质富集的层段往往发育于湖湾、沼泽等浅水、局限水体。低水体环境是有机质富集的最佳环境。在气候较为干冷的环境下，湖平面较低，近陆源的封闭环境会接受来自陆源的有机质聚集。同时较冷的气候对氧化反应有抑制作用，对封闭环境内的有机质起到保护。当古气候由干冷转换为暖湿时，降水作用增强，湖平面抬升。与此同时封闭的水体转为开放水体，有机质难以在封闭环境中保存，转而进入半深湖-深湖等深水、开放环境。针对千岛湖的溶解氧和浮游生物垂向分布研究<sup>[40]</sup>，研究结果认为水深与溶解氧含量之间并非呈负相关关系。在经过一段温跃层溶解氧最小值段(MOM)后，溶解氧含量随深度的增加而迅速增加，与此同时浮游生物的含量也在减少。这直接导致层段内部初级生产力降低的同时，氧化作用也相对增强。温暖的环境会促进上述氧化作用，以上条件均对有机质的保存不利(图6)。

结合上述讨论，可以得出以下结论：暖湿的气候伴随着湖进，湖平面抬升，往往不利于有机质富集，

干冷气候伴随着湖退，湖平面下降，会对有机质富集起到促进作用。

选择SN65井营城组一段高产层段(1518~1592 m)进行长偏心率与有机质富集控制作用的讨论。该层段包含3个长偏心率旋回和12个短偏心率旋回，即3个四级层序和12个五级层序。由于总有机碳(TOC)含量是表征岩石内部有机质富集程度的较好指标。将实测TOC与长偏心率滤波曲线进行比对，可观察到实测TOC的变化趋势与长偏心率曲线互相响应，且二者互为反相。即实测TOC高值层段对应长偏心率曲线的波谷，实测TOC低值层段对应长偏心率曲线的波峰。此外，以实测TOC为锚点，通过多元回归分析方法得到了计算TOC曲线。其变化趋势与实测TOC的基本一致。二者相互印证，表明该层段的有机质富集受长偏心率天文旋回的控制。并以长偏心率曲线的半幅点为界，划分4个富有机质层段和3个含有机质层段(图7)。

在短偏心率旋回周期控制的尺度下，虽然也可以观察到实测TOC的部分峰值对应短偏心率曲线的波谷，但由于TOC取样密度限制等因素，难以在短偏心率周期尺度内展开上述规律性总结。因此，在四级旋回以上的尺度，可直接利用天文旋回滤波曲线对研究区的TOC富集情况进行预测。

### 4.3 米氏旋回控制下的有机质富集模式

米氏旋回对地球的古气候起到控制作用，而气候的周期性变化会对页岩有机质的富集造成影响。将偏心率曲线以半幅点为界，偏心率曲线高值附近划分为

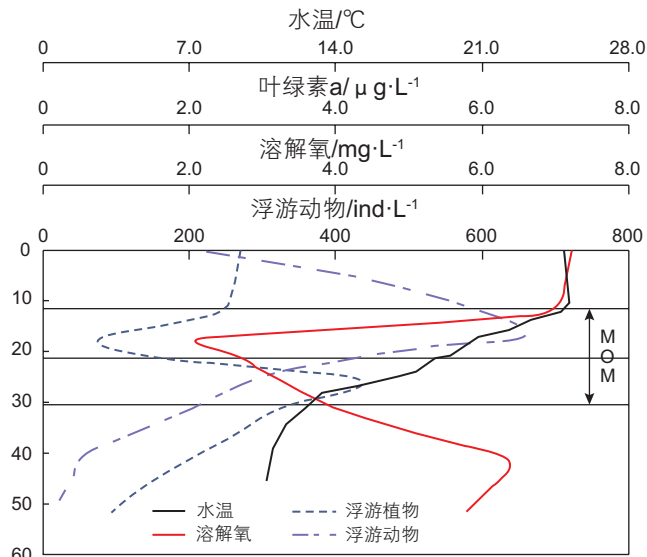


图6 千岛湖水温、溶解氧和浮游生物随深度的变化曲线(据文献<sup>[40]</sup>改编)

Fig. 6 Variation of water temperature, dissolved oxygen, and plankton in Qiandao Lake with depth (modified from references<sup>[40]</sup>)

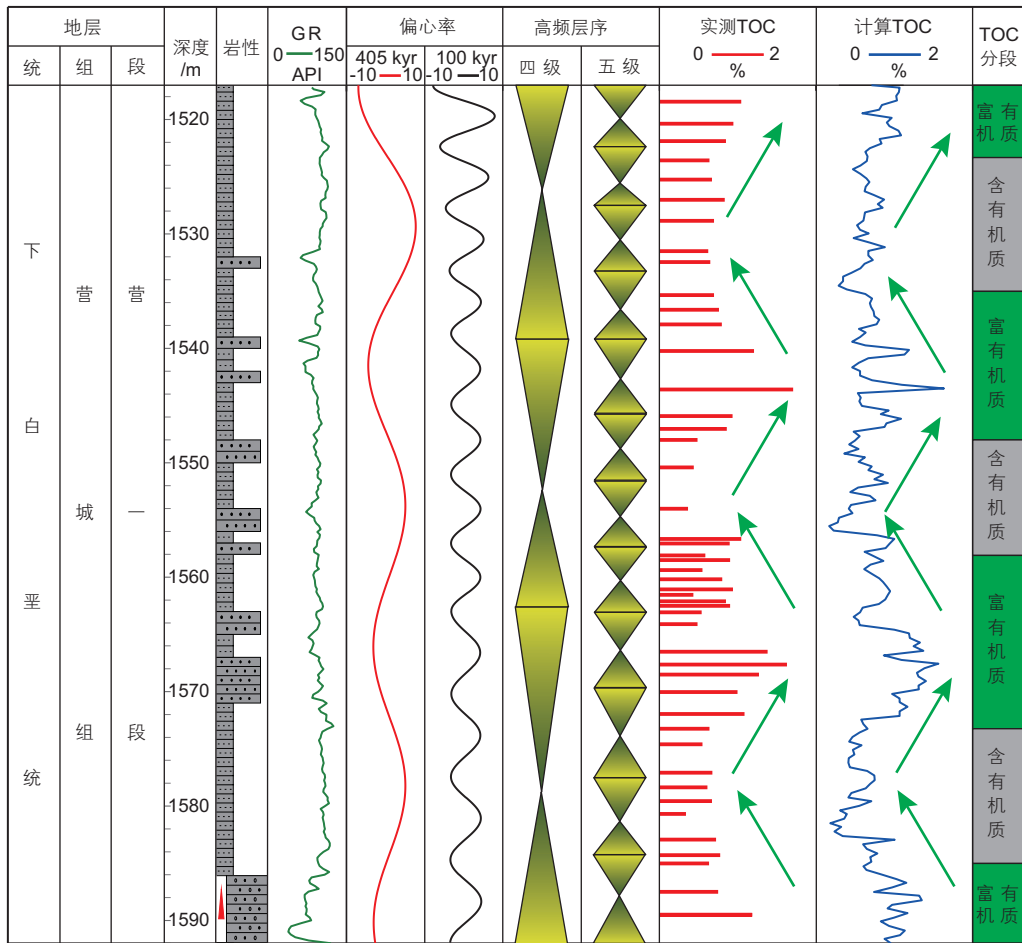


图7 SN65井营一段旋回地层划分、有机质富集综合柱状图

Fig. 7 Comprehensive histogram of stratigraphic classification and organic matter enrichment of the Section 1 of Yingcheng Formation of Well SN65

气候暖湿半旋回，偏心率曲线低值附近划分为气候干冷半旋回。并分别建立暖湿气候沉积模式和干冷气候沉积模式。

当偏心率极大值附近时，气候的季节性变强。夏季极地地区的冰川加速融化，季风作用增强，大气从海洋流向大陆，将丰富的水蒸气带向大陆，导致大陆地区的降水增强。内陆湖水的补给速率大于蒸发速率，湖平面升高。在页岩沉积的层段，虽然陆源碎屑输入变强，可在湖盆底部沉积厚层泥页岩，但由于页岩沉积于MOM段以下，溶解氧浓度相对偏高。来自陆源输入和湖面浮游生物产生的有机物，在湖底发生氧化。温暖的气候会促进上述氧化作用，导致沉积于厚泥页岩层段中的有机质难以保存，有机质含量普遍偏低(图8)。

当偏心率极小值附近时，气候的季节性变弱。夏季极地地区的冰川融化减缓，季风作用减弱，进而导致大陆地区的降水强度变低。内陆湖水的蒸发速率大

于补给速率，湖平面下降。此时页岩沉积的层段位于MOM段内，溶解氧在该层段处于低值。陆源输入和湖面浮游生物产生的有机物保存较好，这导致沉积于泥页岩中的有机质普遍含量较高(图9)。

该模式强调米氏旋回通过调控地球的古气候，对两极冰川的融化速率造成影响，进而对全球气候产生周期性变化，从有机质富集的角度对页岩储层的发育起到控制作用。同时在页岩沉积环境分析中引入MOM，强调古水深并不是控制氧化或还原环境的唯一因素。在实际勘探工作中，应结合上述有机质富集模式进行综合考虑。

#### 4.4 天文旋回与页岩油气勘探

梨树断陷北斜坡营城组的泥页岩由于非均质性较强，总体上制约了该层段的非常规油气勘探开发工作。上述研究指出，米氏旋回可以通过调控古气候的方式，影响页岩层段的沉积模式，从而在垂向上控制TOC的

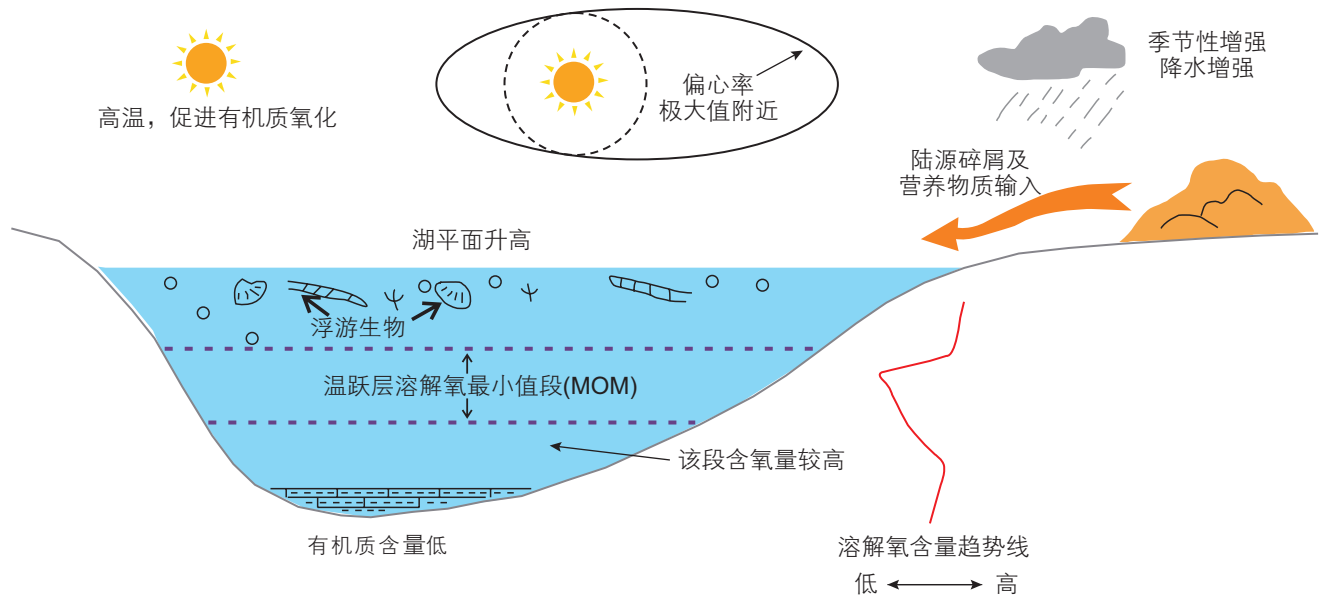


图 8 暖湿气候湖相页岩沉积模式

Fig. 8 Depositional model of shale affected by astronomical cycles under a warm-humid climate

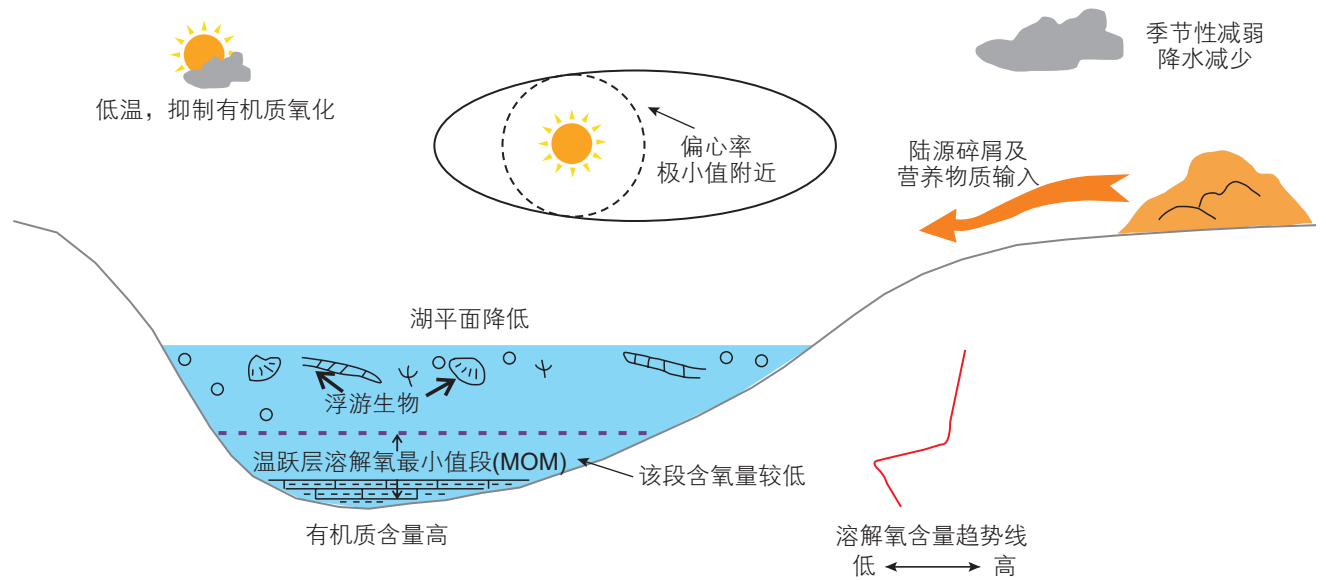


图 9 干冷气候湖相页岩沉积模式

Fig. 9 Depositional model of shale affected by astronomical cycles under a cold-dry climate

分布。传统研究认为深水层段有利于富集有机质，同时对应层序地层学中的最大湖泛面。但本次通过研究米氏旋回对页岩有机质富集的规律，以及参照米氏旋回控制下的有机质富集模式，认为深水层段并不是页岩有机质富集的最佳层段，浅水层段反倒更有利于页岩中有机质的富集。在高分辨率层序地层学中，对应基准面上升半旋回的底部与基准面下降半旋回的顶部，而不是最大湖泛层段。在页岩油气的勘探开发工作中，可以参考上述理论进行甜点区的预测。

### 5 结论

本文对松辽盆地梨树断陷北斜坡进行米氏旋回与层序地层分析，并在此基础上针对米氏旋回对页岩有机质富集的控制作用进行讨论，并且构建了页岩沉积环境模式。主要结论如下：

- 1) 通过对梨树断陷北斜坡 SN65 井营城组进行天文旋回分析。营一、二段由 405 kyr 长偏心率、100 kyr

短偏心率、40 kyr斜率、20 kyr岁差控制的旋回厚度分别为24.84 m、6.55 m、2.73 m、1.25 m；营三、四段由405 kyr长偏心率、100 kyr短偏心率、40 kyr斜率、20 kyr岁差控制的旋回厚度分别为21.89 m、5.89 m、2.20 m、1.20 m。同时均通过了COCO检验，显示该层段较好保存有米兰科维奇旋回信号。

2) 利用米兰科维奇旋回的时间属性，将长偏心率与四级层序相对应、短偏心率与五级层序相对应。并结合高分辨率层序地层学中基准面概念，将SN65井营城组划分为14个四级层序与50个五级层序。营一、二段每个四级旋回约包含4个五级旋回、营三、四段每个四级旋回约包含3个五级旋回，并在研究区建立了四级和五级层序等时地层格架。

3) 在米氏旋回分析的基础上，引入MOM段的概念，探究米氏旋回对有机质富集的控制。长偏心率高值对应暖湿气候半旋回，长偏心率低值对应干冷气候半旋回。偏心率极大值附近，气候暖湿，湖平面升高。页岩沉积层段位于MOM段以下，陆源输入和浮游生物产生的有机质受氧化作用，不利于有机质保存，TOC含量偏低；偏心率极小值附近，气候干冷，湖平面降低。页岩沉积层段包含于MOM段内，陆源输入和浮游生物产生的有机质氧化程度低，利于有机质保存，TOC含量较高。以长偏心率曲线的半幅点为界，划分4个富有机质页岩层段与3个含有机质页岩层段。

## 参考文献

- [1] 姜在兴. 沉积体系及层序地层学研究现状及发展趋势[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(05): 535-541, 514. [JIANG Z X. Studies of depositional systems and sequence stratigraphy: The present and the future[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(05): 535-541, 514.]
- [2] 孙盼科, 贾浪波, 朱红璋, 等. 南堡凹陷柳赞地区沙三段中上部层序结构及沉积充填特征研究[J]. 石油科学通报, 2021, 6(01): 16-30. [SUN P K, JIA L B, ZHU H Z, et al. Sequence architecture and sedimentary filling characteristics of the middle upper part of the Es3 Formation in the Liuzan Area, Nanpu Depression[J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(01): 16-30.]
- [3] SLATT R M, RODRIGUEZ N D. Comparative sequence stratigraphy and organic geochemistry of gas shales: Commonality or coincidence?[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2012, 8: 68-84.
- [4] 石巨业, 金之钧, 刘全有, 等. 天文旋回在页岩油勘探及富有机质页岩地层等时对比中的应用[J]. 地学前缘, 2023, 30(04): 142-151. [SHI J Y, JIN Z J, LIU Q Y, et al. Application of astronomical cycles in shale oil exploration and in high-precision stratigraphic isochronous comparison of organic-rich fine-grain sedimentary rocks[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(04): 142-151.]
- [5] 杜学斌, 刘辉, 刘惠民, 等. 细粒沉积物层序地层划分方法初探: 以东营凹陷樊页1井沙三下-沙四上亚段泥页岩为例[J]. 地质科技情报, 2016, 35(04): 1-11. [DU X B, LIU H, LIU H M, et al. Methods of sequence stratigraphy in the fine-grained sediments: A case from the upper fourth sub-member and the lower third sub-member of the Shahejie Formation in Well Fanye 1 of Dongying Depression[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(04): 1-11.]
- [6] 吴怀春, 张世红, 冯庆来, 等. 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), 2011, 36(03): 409-428. [WU H C, ZHANG S H, FENG Q L, et al. Theoretical basis, research advancement and prospects of cyclostratigraphy[J]. Earth Science(Journal of China University of Geosciences), 2011, 36(03): 409-428.]
- [7] 赵少泽, 李勇, 程乐利, 等. 上扬子地区五峰组-龙马溪组黑色页岩高频层序划分[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(11): 1808-1818. [ZHAO S Z, LI Y, CHENG L L, et al. Division of high-frequency sequences in black shales of the Wufeng-Longmaxi formations, Upper Yangtze Region[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(11): 1808-1818.]
- [8] WU H C, ZHANG S H, SUI S H, et al. Recognition of Milankovitch cycles in the natural gamma-ray logging of Upper Cretaceous terrestrial strata in the Songliao Basin[J]. Acta Geologica Sinica-english Edition, 2007, 81(6): 996-1001.
- [9] 陈果. 滨浅湖细粒沉积烃源岩有机质富集机理研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019. [CHEN G. Organic matter enrichment of fine-grained source rock in shallow lake facies[D]. Beijing: China University of Petroleum-Beijing, 2019.]
- [10] 王淳, 石巨业, 朱如凯, 等. 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/OL]. 沉积学报. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.016>. [WANG B, SHI J Y, ZHU R K, et al. Organic matter enrichment model of lacustrine fine-grained sedimentary rocks driven by astronomical cycles: A case study of the lower Es3 and upper Es4 sub-member in Well LY1, Dongying Sag[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.016>.]
- [11] 程涛, 康洪全, 杜学斌, 等. 松辽盆地北部嫩江组非海相层序地层特征[J]. 断块油气管道, 2017, 24(04): 481-485, 499. [CHENG T, KANG H Q, DU X B, et al. Non-marine sequence stratigraphic characteristics of Nenjiang Formation, Northern Songliao Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2017, 24(04): 481-485, 499.]
- [12] “十三五”期间松辽盆地陆相页岩油气调查取得重要突破[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(01): 82. [Important breakthrough was made in continental shale oil and gas investigation in Songliao Basin during the 13th Five-Year Plan period [J]. China Mine Engineering,

- 2021, 50(01): 82.]
- [13] 熊壮, 胡望水, 王丹, 等. 梨树断陷营一段页岩气资源评价[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(02): 78–83. [XIONG Z, HU W S, WANG D, et al. Resource assessment of shale gas in the First Member of Yingcheng Formation in Lishu Depression[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(02): 78–83.]
- [14] 陈岑, 胡望水, 熊壮, 等. 松辽盆地梨树断陷营城组一段页岩气成藏条件分析[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(21): 6066–6071. [CHEN C, HU W S, XIONG Z, et al. Reservoir forming conditions of shale gas in the first member of Yingcheng Formation of Lishu Fault, Songliao Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(21): 6066–6071.]
- [15] 郝悦娟. 梨树断陷北部斜坡带营城组沉积相研究[D]. 中国地质大学(北京), 2012. [HAO Y J. Research on sedimentary facies of Yingcheng Formation in the North Slope Zone of Lishu Fault Depression[D]. China University of Geosciences(Beijing), 2012.]
- [16] 单敬福, 葛黛薇, 乐江华, 等. 松辽盆地东南缘层序地层与沉积体系配置及演化——以梨树断陷西北部营城组地层为例[J]. 沉积学报, 2013, 31(01): 67–76. [SHAN J F, GE D W, LE J H, et al. Framework of sequence stratigraphy, sedimentary system and evolution of southeastern Songliao Basin: an example from Yingcheng Formation in Lishu Fault Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(01): 67–76.]
- [17] 陈贤良, 樊太亮, 王宏语, 等. 松辽盆地梨树断陷层序结构特征及岩性地层圈闭[J]. 地层学杂志, 2016, 40(03): 308–317. [CHEN X L, FAN T L, WANG H Y, et al. Sequence structures and lithologic-stratigraphic traps in the Lishu Rift, Songliao Basin[J]. Journal of Stratigraphy, 2016, 40(03): 308–317.]
- [18] 蔡来星, 操应长, 卢双舫, 等. 梨树断陷营城组层序地层格架与沉积相特征[J]. 沉积学报, 2014, 32(03): 576–585. [CAI L X, CAO Y C, LU S F, et al. Framework of sequence stratigraphy and depositional characteristics of Yingcheng Formation in Lishu Fault Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(03): 576–585.]
- [19] 邹才能, 邱振. 中国非常规油气沉积学新进展——“非常规油气沉积学”专辑前言[J]. 沉积学报, 2021, 39(01): 1–9. [ZOU C N, QIU Z. Preface: New advances in unconventional petroleum sedimentology in China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(01): 1–9.]
- [20] 张君峰, 徐兴友, 白静, 等. 松辽盆地梨树断陷白垩系沙河子组陆相页岩气形成条件与勘探突破[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(03): 440–452. [ZHANG J F, XU X Y, BAI J, et al. Accumulation and exploration of continental shale gas resources of Cretaceous Shahezi Formation in Lishu Fault Depression, Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(03): 440–452.]
- [21] 苏圣民, 蒋有录, 刘玉虎. 松辽盆地梨树断陷下白垩统储层沥青特征及其与油气成因的关系[J]. 天然气工业, 2023, 43(02): 44–55. [SU S M, JIANG Y L, LIU Y H, et al. Development characteristics of Lower Cretaceous reservoir bitumen and its relationship with oil and gas genesis in the Lishu Rift, Songliao Basin[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(02): 44–55.]
- [22] 杨特波, 王宏语, 樊太亮, 等. 梨树断陷苏家屯地区营城组沉积特征[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(03): 349–356. [YANG T B, WANG H Y, FAN T L, et al. Sedimentary characteristics of Yingcheng Formation in Sujiatun Area, Lishu Rift in Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(03): 349–356.]
- [23] 贾东力, 田景春, 林小兵, 等. 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, 2018, 39(04): 749–758. [JIA D L, TIAN J C, LIN X B, et al. Milankovitch cycles in the Silurian Kepingtage Formation in Shuntuoguole Area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(04): 749–758.]
- [24] 吴怀春, 房强. 旋回地层学和天文时间带[J]. 地层学杂志, 2020, 44(03): 227–238. [WU H C, FANG Q. Cyclostratigraphy and astrochronozones[J]. Journal of Stratigraphy, 2020, 44(03): 227–238.]
- [25] HINNOV L A. Stratigraphy & Timescales[M]: Elsevier, 2018.
- [26] 汪品先. 地质计时的天文“钟摆”[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, (01): 1–7. [WANG P X. Astronomical “pendulum” for geological clock[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006(01): 1–7.]
- [27] 吴怀春, 钟阳阳, 房强, 等. 古生代旋回地层学与天文地质年代表[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(05): 750–770, 696. [WU H C, ZHONG Y Y, FANG Q, et al. Paleozoic cyclostratigraphy and astronomical time scale[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2017, 36(05): 750–770, 696.]
- [28] LI M S, HINNOV L, KUMP L. Acycle: Time-series analysis software for paleoclimate research and education[J]. Computers & Geosciences, 2019, 127: 12–22.
- [29] 金之钧, 范国章, 刘国臣. 一种地层精细定年的新方法[J]. 地球科学, 1999, 24(04): 379–382. [JIN Z J, FAN G Z, LIU G C. A new method for accurate dating of strata[J]. 地球科学, 1999, 24(04): 379–382.]
- [30] LI M S, KUMP L R, HINNOV L A, et al. Tracking variable sedimentation rates and astronomical forcing in Phanerozoic paleoclimate proxy series with evolutionary correlation coefficients and hypothesis testing[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 501: 165–179.
- [31] NIO S D, BROUWER J H, SMITH D, et al. Spectral trend attribute analysis: Applications in the stratigraphic analysis of wireline logs[J]. First Break, 2005, 23(4): 71–75.

- [32] 吴峰, 郭来源, 张道军, 等. 基于高精度岩心扫描元素数据的高频层序划分: 以西科1井第四系生物礁滩体系为例[J]. 地质科技情报, 2016, 35(05): 42-51. [WU F, GUO L Y, ZHANG D J, et al. High resolution sequence units division based on geochemical data: Taking quaternary reef-bank strata of Well XK1 as an example[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(05): 42-51.]
- [33] 石巨业, 金之钧, 刘全有, 等. 基于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, 2017, 35(03): 436-448. [SHI J Y, JIN Z J, LIU Q Y, et al. 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, 2017, 35(03): 436-448.]
- [34] 石巨业, 金之钧, 刘全有, 等. 基于米兰科维奇理论的湖相细粒沉积岩高频层序定量划分[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(06): 1205-1214. [SHI J Y, JIN Z J, LIU Q Y, et al. Quantitative classification of high-frequency sequences in fine-grained lacustrine sedimentary rocks based on Milankovitch theory[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(06): 1205-1214.]
- [35] 赵军, 赵凯, 张金宇. 基于米氏旋回的三角洲前缘油层对比研究[J]. 沉积学报, 2022, 40(03): 801-812. [ZHAO J, ZHAO K, ZHANG J Y. Division and comparison of oil reservoirs in delta front from Milankovitch astronomical cycles[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(03): 801-812.]
- [36] 周靖皓, 鲜本忠, 张建国, 等. 高频旋回地层约束下的湖相页岩有机质富集规律: 以东营凹陷古近系沙三下亚段为例[J]. 古地理学报, 2022, 24(04): 759-770. [ZHOU J H, XIAN B Z, ZHANG J G, et al. Organic matter enrichment law of lacustrine shale constrained by high resolution cyclostratigraphy: A case study from the lower sub-member of Member 3 of Paleogene Shahejie Formation, Dongying sag[J]. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition), 2022, 24(04): 759-770.]
- [37] 张瑞, 金之钧, 李明松, 等. 中三叠世鄂尔多斯盆地富有机质页岩发育的天文调控[J]. 第四纪研究, 2023, 43(06): 1547-1561. [ZHANG R, JIN Z J, LI M S, et al. Astronomical regulation of the Middle Triassic organic-rich shales in the Ordos Basin[J]. Quaternary Sciences, 2023, 43(06): 1547-1561.]
- [38] 毛小平, 陈修蓉, 李振, 等. 浅议四川盆地五峰组—龙马溪组页岩沉积模式与有机质富集规律[J/OL]. 沉积学报. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.060>. [MAO X P, CHEN X R, LI Z, et al. Shale sedimentary patterns and organic matter enrichment patterns of the Wufeng-Longmaxi Formation in the Sichuan Basin[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica: <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.060>.]
- [39] 毛小平, 陈修蓉, 陈永进, 等. 以初级生产力与固碳规律为线索探讨陆相页岩中有机质的富集规律[J]. 地球科学: 2024, 49(04): 1224-1244. [MAO X P, CHEN X R, CHEN Y J, et al. Discussion on the enrichment law of organic matter in continental shale with the clue of primary productivity and carbon storage law[J]. Earth Science: 2024, 49(04): 1224-1244.]
- [40] 俞焰, 刘德富, 杨正健, 等. 千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2017, 38(04): 1393-1402. [YU Y, LIU D F, YANG Z J, et al. Vertical stratification characteristics of dissolved oxygen and phytoplankton in Qiandao lake and their influencing factors[J]. Environmental Science, 2017, 38(04): 1393-1402.]

(编辑 付娟娟)