

松辽盆地古龙地区晚白垩世青山口组二—三段层序结构与古气候的耦合分析

孟令浩^{1,2,3}, 方石^{1,2,3*}, 付丽⁴, 王磊⁴

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061;
2. 吉林省页岩与共生能源矿产重点实验室, 长春 130061;
3. 自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室, 长春 130061;
4. 大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712

摘要: 本文以晚白垩世青山口组二—三段为研究对象, 利用松辽盆地古龙地区 J2C 井的岩心与测井资料, 开展了钻井沉积相和层序地层划分、磁化率与色度测试、测井曲线小波变换分析, 结合聚类分析等方法, 系统揭示了陆相湖盆高频气候振荡与层序发育的耦合关系。主要取得以下认识: ①研究区青山口组二—三段发育湖泊相与三角洲相两种沉积环境, 可进一步细分为深湖泥、半深湖泥、介壳砂、浊积岩、前三角洲泥及席状砂 6 类微相, 建立了三角洲-湖泊沉积演化模式。②通过岩性组合、测井响应特征及小波变换时频分析, 在研究层段识别出 2 个完整三级层序, 划分出低位 (LST)、水进 (TST)、高位 (HST) 及水退 (RST) 体系域, 其中层序界面表现为 GR 曲线拐点、岩性突变及时频能量团转换特征。③基于 SPSS 聚类分析的磁化率与色度指标定量重建了古气候演化序列, 揭示研究层段经历“变冷-变暖-变冷-变暖-变冷”的旋回过程, 其中 86.895~86.364 Ma 异常暖湿期与湖泊缺氧事件 (LAEs) 密切相关, 其形成机制可归因于水文循环加速引发的陆源粗碎屑输入增强与还原环境强化。总体来看古气候通过调控水文循环与物源供给驱动层序结构分异: 温暖湿润期水循环增强, 细粒泥岩发育, 形成水进与高水位体系域; 相对干燥寒冷期水循环减弱, 沉积物以粗粒重力流沉积为主, 形成水退与低水位体系域。

关键词: 层序结构; 古气候; 青山口组; 时频分析; 聚类分析

Coupling analysis of sequence architecture and paleoclimate in members 2 and 3 of Late Cretaceous Qingshankou Formation, Gulong area, Songliao Basin

收稿日期/Received: 2025-03-29; 修订日期/Revised: 2025-05-02; 出版日期/Published: 2025-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41472173)

第一作者: 孟令浩 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事沉积学、构造热年代学方面的研究。E-mail: m2257779751@163.com

* 通信作者: 方石 (1974—), 男, 副教授, 主要从事油气勘探、沉积学、构造热年代学方面的研究。E-mail: fs812625@vip.sina.com

© Editorial Office of World Geology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

MENG Linghao^{1, 2, 3}, FANG Shi^{1, 2, 3*}, FU Li⁴, WANG Lei⁴

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;

2. Key Laboratory of Oil Shale and Coexistent Energy Minerals of Jilin Province, Changchun 130061, China;

3. Key Laboratory of Northeast Asia Mineral Resources Evaluation, Ministry of Natural Resources, Changchun 130061, China;

4. Research Institute of Exploration and Development, Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing 163712, Heilongjiang, China

Abstract: This study investigates members 2–3 of the Late Cretaceous Qingshankou Formation in the Gulong area of the Songliao Basin. By integrating core data, well-logging information, magnetic susceptibility and chromaticity measurements, wavelet transform analysis of logging curves, and cluster analysis, the coupling mechanism between high-frequency climatic oscillations and sequence development in continental lacustrine basins was systematically revealed. The principal findings are summarized as follows: ① Two depositional environments lacustrine and deltaic facies were identified in the studied interval, which were further subdivided into six microfacies: deep-lake mud, semi-deep lake mud, shell sand, turbidite, prodelta mud, and sheet sand. A delta-lacustrine sedimentary evolution model was established to characterize their vertical stacking patterns. ② Two complete third-order sequences were recognized based on lithologic associations, well-logging responses, and wavelet transform time-frequency analysis. These sequences were divided into four system tracts, lowstand (LST), transgressive (TST), highstand (HST), and regressive (RST). Sequence boundaries were characterized by GR curve inflection points, lithologic abrupt changes, and energy cluster transitions in time-frequency spectrograms. ③ Paleoclimate evolution was quantitatively reconstructed using magnetic susceptibility and chromaticity indices through SPSS cluster analysis. The results revealed a climatic cyclicity of “cooling-warming-cooling-warming-cooling” with an anomalously warm-humid phase during 86.895–86.364 Ma closely linked to lacustrine anoxic events (LAEs). This phase was attributed to enhanced hydrological cycling-triggered terrestrial coarse clastic input and intensified reducing conditions. Overall, paleoclimate governed sequence differentiation by regulating hydrological cycling and sediment supply. During warm-humid phases, strengthened water circulation promoted fine-grained mudstone deposition, forming TST and HST system tracts, whereas under relatively dry-cold conditions, weakened water circulation favored coarse-grained gravity flow sedimentation, developing RST and LST system tracts.

Keywords: sequence architecture; paleoclimate; Qingshankou Formation; time-frequency analysis; cluster analysis

0 引言

陆相湖盆沉积体系的层序结构受控于古气候波动与盆地动力条件的协同作用,其垂向叠置样式和横向相变速率显著,常形成多尺度旋回层序^[1-2]。研究表明,陆相湖盆层序发育主要受控于构造沉降、古气候驱动的湖平面波动及物源供给的协同作用^[3-5]。其中气候主要通过调节陆表风化强度与驱动降水量变化影响岩相类型和陆源碎屑输入量,进而控制陆相湖盆层序的发育^[6-7]。通过划分沉积微相并建立层序地层格架,可有效识别气候驱动下的沉积响应特征,揭示古气候波动对沉积相组合类型及层序界面演化的控制机制^[8]。

松辽盆地晚白垩世青山口组是中国东北地区重要的陆相湖盆层系,沉积期处于区域性弱伸展构造环境,古气候整体处于温暖湿润气候,碎屑物质以细粒为主,形成广覆式三角洲-湖泊沉积体系^[9-11]。近年来,学者通过多种技术对青山口组层序结构影响因素做了详细研究。蔡希源等^[12]运用数值模拟方法对松辽断陷盆地层序地层模拟,认为青山口组层序结构受控于湖平面变化;Wang等^[13]基于横剖面上砂体对比和相分布的分析对青山口组三段进行层序划分,认为层序结构受湖泊水位变化与构造共同控制。Feng等^[14]基于岩心观察、测井曲线分析与三维地震剖面识别了3种三级层序和两种类型的层序结构,推测层序受盆地幕式构造与古气候的控制。

从前人研究可以看出, 松辽盆地青山口组二—三段虽已建立层序地层格架, 并初步分析了层序结构受控因素, 但古气候波动如何通过调控水文循环与物源供给通量, 影响层序界面类型及旋回内部沉积相组合的分异规律尚未明确。青山口组二—三段作为陆相湖盆典型富含有机质页岩与砂岩互层段, 其层序结构对古气候的敏感性可能更为显著, 这种气候-沉积响应的二元性使其成为揭示陆相层序气候敏感机制的理想载体, 因此可以利用研究层段解析高频气候振荡与沉积动力学过程的相互作用, 系统揭示古气候波动驱动层序结构分异的微观机制, 进而阐明气候-层序耦合关系的空间表征与演化规律。

磁化率与色度是便宜、便捷的古气候代用指标, 可以恢复湖泊的古气候, 前人运用磁化率和色度数据较为精准地识别出抚顺盆地始新世的古气候演化^[15], 并与深海底栖有孔虫碳氧同位素指示的气温演化过程良好吻合^[16]。因此本文研究利用松辽盆地青山口组二—三段的岩相与测井曲线资料划分沉积微相与高频层序, 并对全井段取心开展磁化率与色度测试, 分析古气候与水体循环关系, 以明确青山口组二—三段古气候演化规律对层序结构的控制作用与机制。

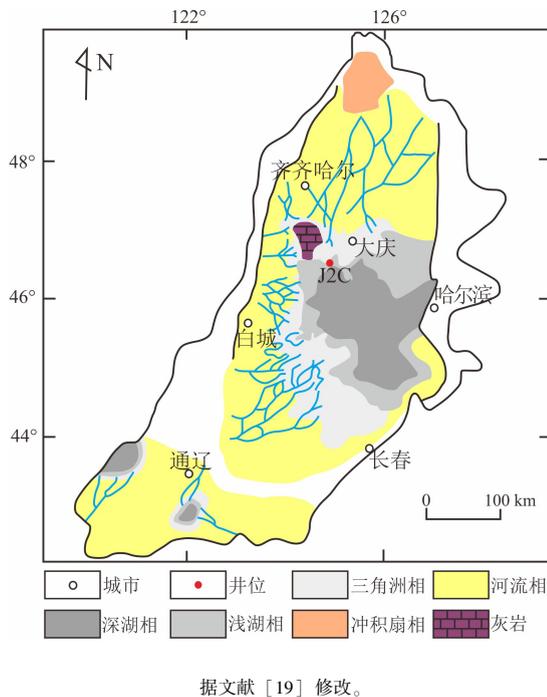
1 地质背景

1.1 区域地质概况

松辽盆地位于中国东北地区中部, 总体面积约为 26 万 km², 是亚洲东部规模最大的中生代陆相含油气盆地。盆地呈北东—西南向展布, 具有典型克拉通内多旋回叠合盆地特征, 其构造格局表现为下断上拗双层结构。现今可划分 6 个一级构造带和 32 个二级构造单元, 构造平缓, 拗隆相间, 大型断裂较少^[17] (图 1)。盆地的基底由前寒武纪—中生代的变质岩和岩浆岩组成^[18], 其上为与之不整合接触的中、新生代陆相沉积盖层, 厚度超过 7 000 m^[19]。

研究区位于盆地内中央凹陷区西部齐家—古龙凹陷内, 研究层段为青山口组地层。该层在垂向上序列可以分为三段, 青一段年龄介于 91.90 ~ 91.00 Ma^[20-22], 属于盆地第一次湖泛期, 沉积了颜色以灰黑色、黑色为主的巨厚泥页岩, 是该层主要烃源岩, 有机质来源丰富^[23]。青山口组二—三段的年龄介于 90.90 ~ 86.13 Ma^[20-22], 此段湖盆范

围减小、陆源粗碎屑成分增加^[20], 有机质来源受沉积环境的影响较大。



据文献 [19] 修改。

图 1 青山口组二—三段岩相古地理图

Fig. 1 Lithofacies paleogeographic map of Qingshankou Formation, members 2-3

1.2 古气候研究现状

松辽盆地是陆相白垩系研究热点地区。前人总结了大量生产资料并与科学钻探井数据相结合, 使该地区气候变化趋势得到揭示^[11,19,24]。黄清华等^[25]基于孢粉资料与岩性资料, 对孢粉气温带与干湿度类型进行划分, 认为青山口组沉积时期整体为湿热气候; 何文渊等^[26]通过对松辽盆地现代湖盆水体分析测试古水体情况, 并结合古龙页岩的常量微量元素、稀土元素及生物标志化合物等方法, 认为古龙页岩形成于温暖潮湿气候; 尹秀珍等^[27]通过对总有机碳含量 (TOC)、有机质碳稳定同位素 ($\delta^{13}\text{C}$)、氢指数 (HI) 和有机质类型的分析, 认为青山口组二—三段晚期集水盆地的古气候经历了温暖-冷-暖湿-温暖且干燥-干冷的演化过程。

2 青山口组二—三段沉积相类型与层序结构

2.1 沉积相划分与演化

2.1.1 沉积相划分

根据岩性、沉积构造与测井资料, 将研究层段

沉积环境分为湖泊相与三角洲相。

(1) 湖泊相

湖泊相是研究区较为发育的沉积相，主要发育深湖亚相与半深湖亚相，并可进一步划分为深湖泥与半深湖泥沉积微相（图2）。深湖泥与半深湖泥通常是由细粒沉积物在深水区卸载，形成的大段连续的暗色泥岩。深湖泥多为灰黑色页岩，半深湖泥以深灰色与灰白色页岩为主，二者均含少量黄铁矿自生矿物，见介壳碎屑与叶肢介化石碎屑（图3a），发育水平层理（图3b）。深湖泥中砂质夹层较少，半深湖泥夹多层灰白色粉砂岩薄层，并发育泄水构造（图3c）与砂球构造（图3d）。深湖泥GR曲线形态相对呈平直状，且DT曲线值较大，反映稳定缺氧环境下的连续沉积；半深湖泥GR曲线波动明显，DT曲线值较小，指示季节性输入变化或弱底流扰动。

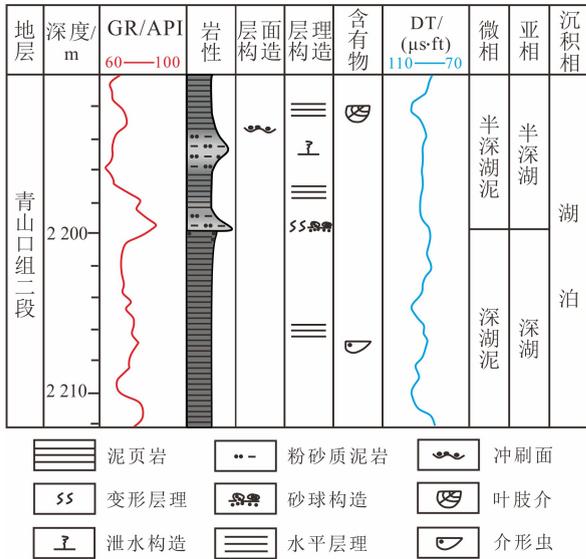
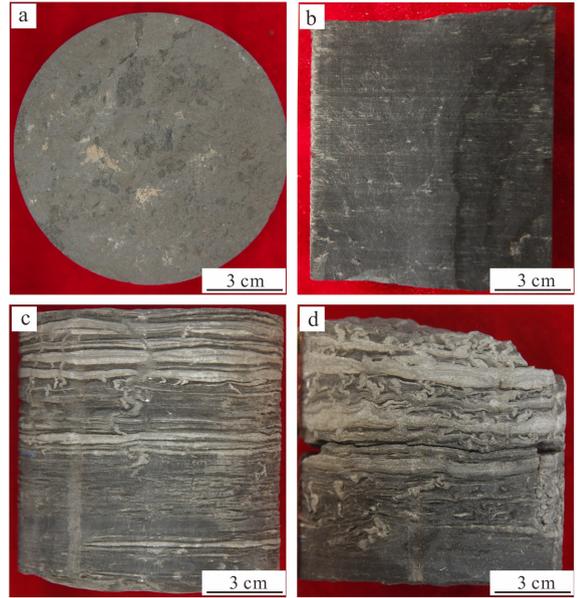


图2 J2C井青山口组二段湖泊相沉积模式图

Fig. 2 Depositional model diagram of lacustrine facies for 2nd member of Qingshankou Formation in Well J2C

湖泊相中还可见因重力主导形成的重力流沉积亚相（图4）。重力流在研究区多以较薄夹层出现，并可进一步细分为介壳砂与浊积岩微相。介壳砂是介形虫层受后期重力流改造与泥质混积而成（图5a），见介壳类化石碎屑（图5b），多发育砂球构造、泄水构造，与泥岩界面见冲刷面或重荷模等层面构造。介壳砂多以薄层出现，具低GR、高DT



a. 2192.5 m, 含介壳碎屑泥页岩; b. 2209.5 m, 高密度纹层泥页岩; c. 2195.8 m, 层状粉砂质泥岩, 夹泥质薄层; d. 2200.5 m, 粉砂质泥岩。

图3 J2C井湖泊相岩心特征

Fig. 3 Core characteristics of lacustrine facies in Well J2C

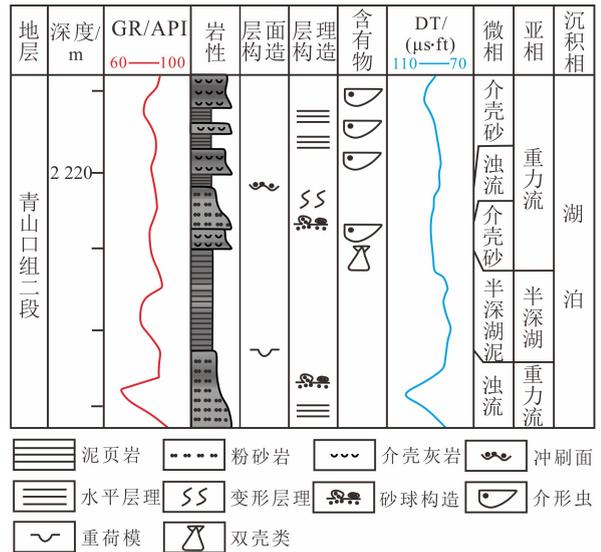
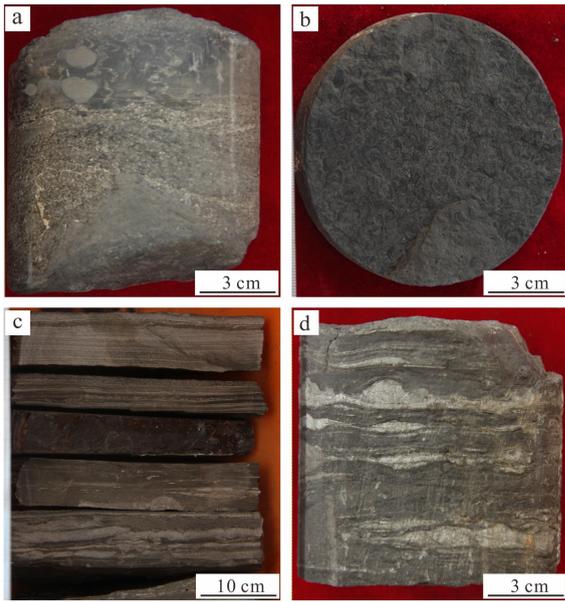


图4 J2C井青山口组二段重力流相沉积模式图

Fig. 4 Depositional model diagram of gravity flow facies for 2nd member of Qingshankou Formation in Well J2C

特征。浊积岩以细砂岩段与泥岩段为主，多为不完整的鲍马序列（图5c），见泄水构造、波纹层理与透镜状层理、层面见重荷模（图5d）。单层厚度在1 m左右，GR与DT曲线呈指型或平滑型。



a. 2 216.5 m, 介壳灰岩薄层; b. 2 222.8 m, 岩心截面介壳碎屑化石;
c. 2 219.5 m, 鲍马序列; d. 2 224.5 m, 泥页岩夹粉砂岩条带。

图 5 J2C 井重力流相岩心特征

Fig. 5 Core characteristics of gravity flow facies in Well J2C

(2) 三角洲相

三角洲沉积体系包括前三角洲亚相与三角洲前缘亚相, 并可进一步分为前三角洲泥与席状砂 (图 6)。前三角洲泥以灰白色浅色泥岩为主 (图 7a), 发育水平层理, 见介壳碎屑 (图 7b), GR 与 DT 呈较高值; 席状砂呈多套叠覆发育, 发育波纹层理 (图 7c), 见逆粒序与砂球构造 (图 7d), GR 与 DT 曲线呈平直状或钟形。

2.1.2 沉积相演化阶段

研究区青山口组二—三段经历了由湖泊相到三角洲相再到湖泊相的演化过程 (图 8)。青二—三段沉积早期, 沉积物岩性以暗灰色、浅灰色泥页岩夹薄层细砂岩与粉砂岩为主, 沉积亚相以半深湖亚相为主, 并可见多套因重力流形成的浊积岩与介壳砂微相; 青二—三段沉积中期湖盆扩张, 粒度向上突然变细, 岩性为灰黑色泥页岩连续沉积; 之后湖盆不断收缩, 大型的三角洲沉积体系继续稳定地向盆内推进, 盆地内依次出现了半深湖亚相、前三角洲亚相、三角洲前缘亚相, 沉积物粒度逐渐变粗; 青二—三段沉积后期, 水体上升湖盆扩张, 沉积物

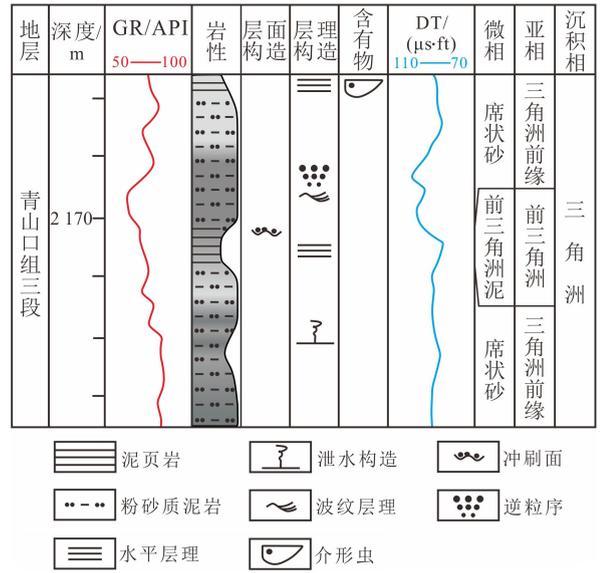
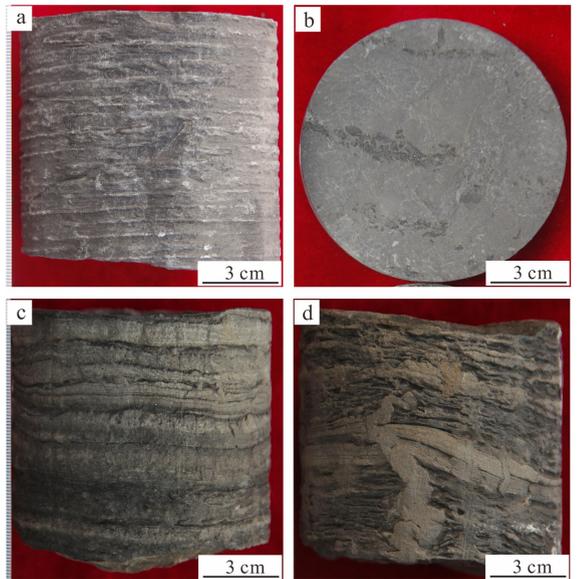


图 6 J2C 井青山口组三段三角洲相沉积模式图

Fig. 6 Depositional model diagram of delta facies for 3rd member of Qingshankou Formation in Well J2C



a. 2 166.3 m, 灰白色泥岩; b. 2 166.8 m, 岩心截面介壳碎屑化石;
c. 2 170.2 m, 粉砂质泥岩; d. 2 174.4 m, 粉砂质泥岩。

图 7 J2C 井三角洲相岩心特征

Fig. 7 Core characteristics of delta facies in Well J2C

在还原环境下沉积了大段灰黑色泥页岩, 沉积亚相由半深湖亚相逐渐过渡到深湖亚相; 青二—三段沉积后期, 进积作用再次加强, 水体快速下降, 湖盆萎缩, 沉积了大段灰白色页岩。

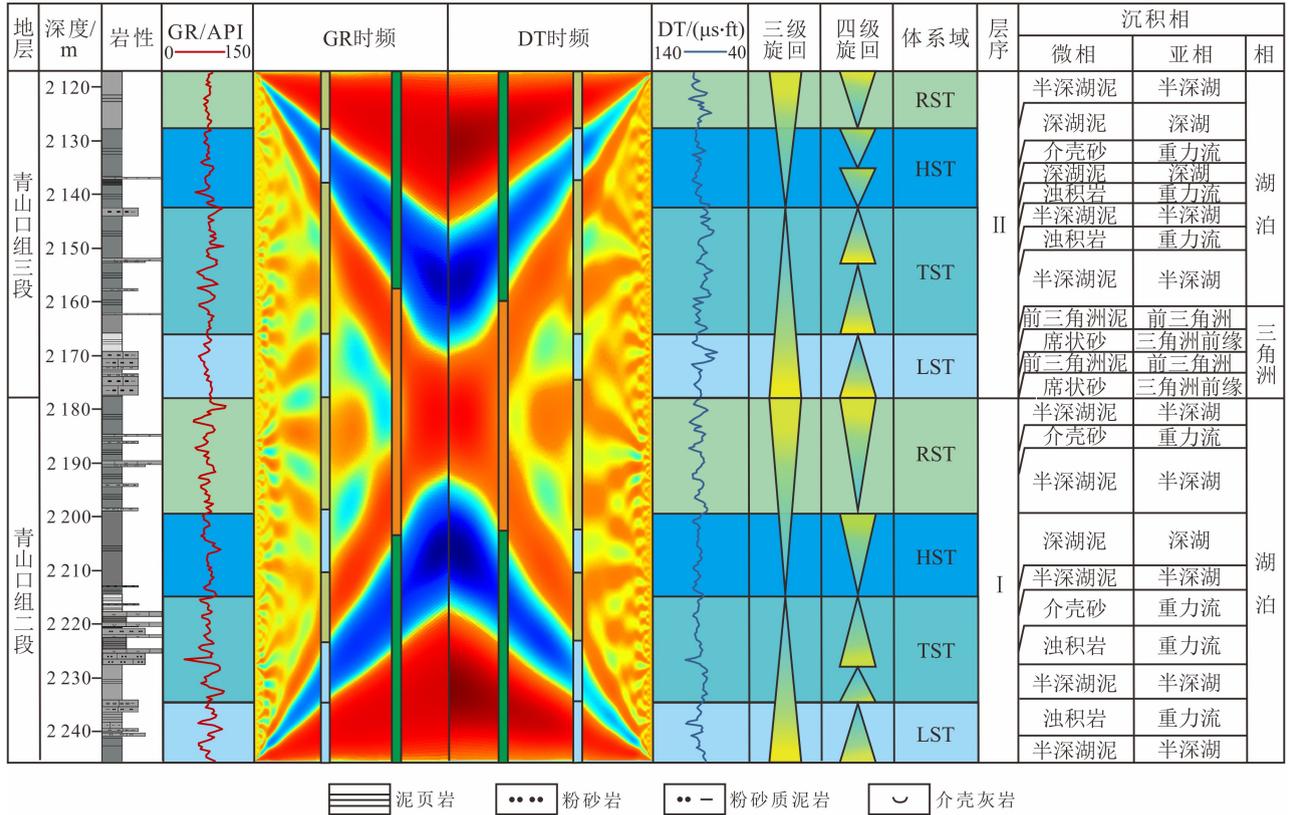


图8 J2C井青山口组二—三段层序体系域与沉积相分类

Fig. 8 Classification of sequence system tracts and sedimentary facies for 2nd and 3rd members of Qingshankou Formation in Well J2C

2.2 层序划分及特征

2.2.1 小波变换原理与分析

地层岩性界面划分是地质矿产勘探的重要环节,测井数据凭借其高分辨率与连续性,成为解析地层的关键依据^[28]。然而,测井解释存在多解性且依赖专业经验,因此采用小波变换等信号处理技术提升解析精度显得尤为必要。小波变换以其优异的时间尺度分析能力,可精准识别不同级别的地质层序界面,其基本原理是利用核函数对信号执行伸缩和平移操作,有效解析不同频率成分,将信号趋势与奇异点反映出来^[29]。测井曲线信号通过小波变换被分解为低频与高频信号,低频信号可以区分地层旋回,高频信号可以放大薄层信号,更好对层序界面识别划分^[30]。

笔者利用从大庆油田取得的J2C井GR曲线、DT曲线通过MATLAB软件进行小波变换分析,经多尺度变换后得到最佳的小波时频色谱,利用时频

色谱能量团强弱的变化与GR曲线变化特征可以划分青山口组二—三段层序。

2.2.2 层序划分特征

本文层序划分利用刘招君等^[4]建立的坳陷湖盆三级层序四分体系域划分法对青山口组二—三段进行层序划分,即LST、TST、HST与RST。LST形成于湖平面低位期,可发育水下重力流沉积,以粗粒沉积为主;TST形成于连续湖进的湖平面上升期,发育半深湖—深湖相暗色泥岩;HST形成于湖平面稳定期至缓慢下降期,以半深湖—深湖相沉积为主;RST形成于高水位期后湖平面缓慢萎缩期,以水退型三角洲—湖泊沉积为主。

层序I底部与青山口组一段存在局部不整合(图8)。层序I顶部界面GR曲线出现先上升、后下降的负向拐点;岩性由页岩转变为粉砂岩;时频图由红黄色的强振幅变为蓝色的弱振幅,判断存在奇异点,指示了沉积环境的变化,因此划分出三级

层序界面。在三级层序界面准确识别的基础上, 利用岩性突变、GR 曲线趋势变化与时频色谱图能量变化划分体系域。

层序 I 发育完整的三级层序, LST 岩心颜色由灰黑色逐渐变为灰色, 岩性以细粒页岩为主, 沉积物粒度逐渐变粗, 顶界面能量团由红色变为蓝色; TST 岩性以灰色页岩为主, 夹薄层灰黑色介壳灰岩与灰色粉砂岩, 顶界面 GR 曲线与 DT 曲线出现拐点, 能量团颜色由红色变为淡蓝色; HST 岩性以灰黑色页岩为主, 顶界面 GR 时频能量团由弱振幅向强振幅变化; RST 岩性以深灰色页岩为主, 夹多层介壳灰岩纹层。

层序 II 发育完整的三级层序, LST 下部岩性以灰色中砂岩为主, 上部发育灰白色页岩, 顶界面能量团由淡黄色逐渐变为暗红色; TST 岩性以灰黑色页岩为主, 夹薄层灰黑色介壳灰岩与灰色粉砂岩, 顶界面 GR 与 DT 曲线出现明显正偏; HST 岩性以灰黑色页岩为主, 夹黑色页岩与薄层灰黑色介壳灰岩, 顶界面能量团由蓝色转变为红色; RST 岩性以灰色页岩为主。

3 磁化率和色度数据测试与处理

3.1 样品分布与特征

本文的样品取自松辽盆地中央凹陷区齐家古龙地区 J2C 井岩心青山口组二—三段, 取样层段为 2 116~2 246 m 段, 岩心岩性以灰黑色页岩为主, 夹少量粉砂岩与介壳灰岩。对层段以 20 cm 垂直间距取样, 共取得样品 650 块。样品为碎块状, 取样后在实验室进行粉碎处理, 并将样品粉末过 200 目筛, 消除粒径对实验结果的影响。所有样品都进行了磁化率与色度的测试。

3.2 磁化率测试原理与数据处理

自然界中的多数岩石含有磁性成分, 这种磁性主要源自于岩石中电子的轨道运动和自旋状态^[31]。当受到外部磁场的影响时, 岩石内部的亚铁磁性矿物会通过感应获得显著的磁化效应。磁化率是一种度量在外部磁场作用下物质被磁化的难易程度的指标^[32-33]。在环境磁学领域, 磁化率能够反映岩石或土壤样本中磁性矿物的相对含量, 用于分析评估环境质量以及重建古气候。因此, 磁化率不仅是基础磁学研究的重要指标, 也是地质学中用于指示气候演化的有力工具。

本文测量磁化率使用的仪器为英国 Bartington 公司生产的 MS2B 磁化率仪, 测试前先对 2 cm × 2 cm × 2 cm 的无磁性样品盒准确称重并记录, 再装入 6 g 左右干燥样品, 记录样品盒与样品总重。待测试环境稳定后, 测量样品磁化率, 对每个样品测量 3 次取平均值。

低频磁化率与高频磁化率变化趋势基本一致 (图 9), 在 2 246~2 226 m 波动幅度较大, 且均取得最高值 $63.057 \times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$ 和 $67.752 \times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$; 之后逐渐上升到 $59.280 \times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$ 和 $66.894 \times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$; 在 2 167 m 至层段顶部呈逐渐下降趋势。频率磁化率波动明显, 其中在 2 142~2 130 m 及 2 210~2 193 m 两段偏移幅度最大, 两段最高值分别为 19.167% 与 25.838%。

3.3 色度测试与数据处理

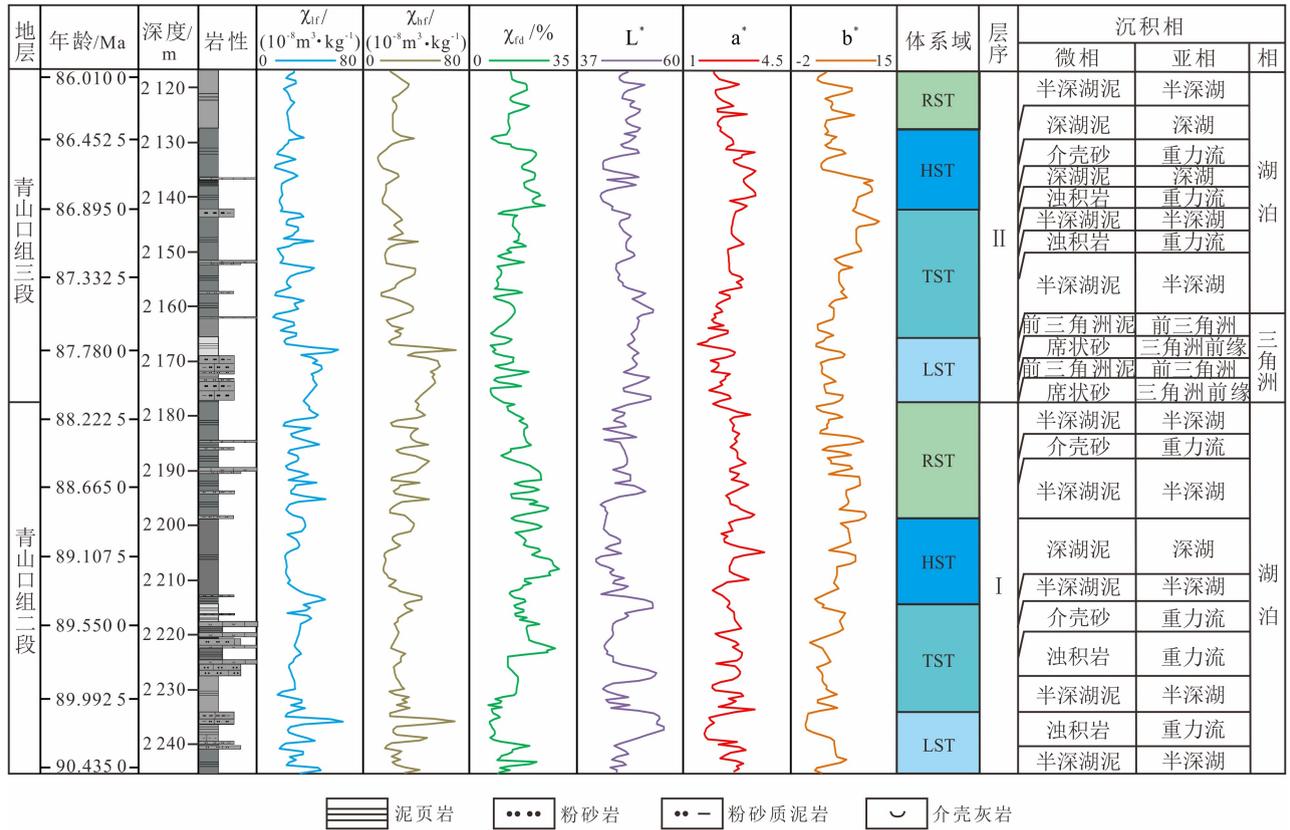
色度即颜色的色调饱和度。颜色是土壤和沉积物最明显的特征之一, 通常与沉积物的铁磁性矿物与有机质含量密切相关, 因此色度可以指示沉积物沉积时所形成的环境^[34-35]。目前主流的色度体系为 CIEL* a* b* 1976 均匀颜色空间, 其中用 L* 值代表颜色亮度 (范围为 0~100, 黑色对应 L* = 0, 白色对应 L* = 100); a* 值代表红度 (范围为 -60~60, 绿色对应 a* = -60, 红色对应 a* = 60), b* 代表黄度 (范围为 -60~60, 蓝色对应 b* = -60, 黄色对应 b* = 60), 用三者的量来反映物质真实颜色^[36]。

本文测量色度使用的仪器为 WR 系列色差仪, 样品粉末在低温烘干后备用, 首先将色差仪进行黑白底色校正; 取适量样品置于测量盒中, 选用 8 mm 口径开启测量; 选择标样测量并对样品的 L*、a*、b* 值进行记录, 重复 3 次取平均值。

L* 值在 2 238~2 216 m 波动幅度较大, 从下至上依次取得极大值 54.482、52.686 与 51.904; 之后呈先上升后下降趋势。a* 值与 b* 值变化趋势相似, 在 2 142~2 130 m 与 2 210~2 193 m 两段存在极大值, 两段极大值分别为 3.16、10.64 及 3.28、11.53。

3.4 数据趋势统计分析

数据在采集处理时会遭受到不需要的修改, 因此在数据处理时需要将这些噪声剔除, 经滤波后提取出有用信号^[37]。聚类分析是滤波的一种, 具体原理为对多个变量数据进行分析, 并在数据间相似



泥页岩
 粉砂岩
 粉砂质泥岩
 介壳灰岩

年代尺度据参考文献 [22]。

图9 磁化率及色度指标分布曲线及相应层序结构特征

Fig. 9 Distribution curves of magnetic susceptibility and chromaticity indices with corresponding sequence stratigraphic characteristics

性的基础上收集分类数据^[38]。对聚类分析后同一类的数据进行分段平均,并用平均值代替这一类数据,去趋势化后的数据可以更直观看清变化趋势,有利于分类讨论。

通过数据分析软件 SPSS26 对低频磁化率、高频磁化率、频率磁化率、亮度、红度和黄色指标分别进行聚类分析,并将每种数据分为 6 类后取各类均值,过程见图 10,处理结果见图 11。

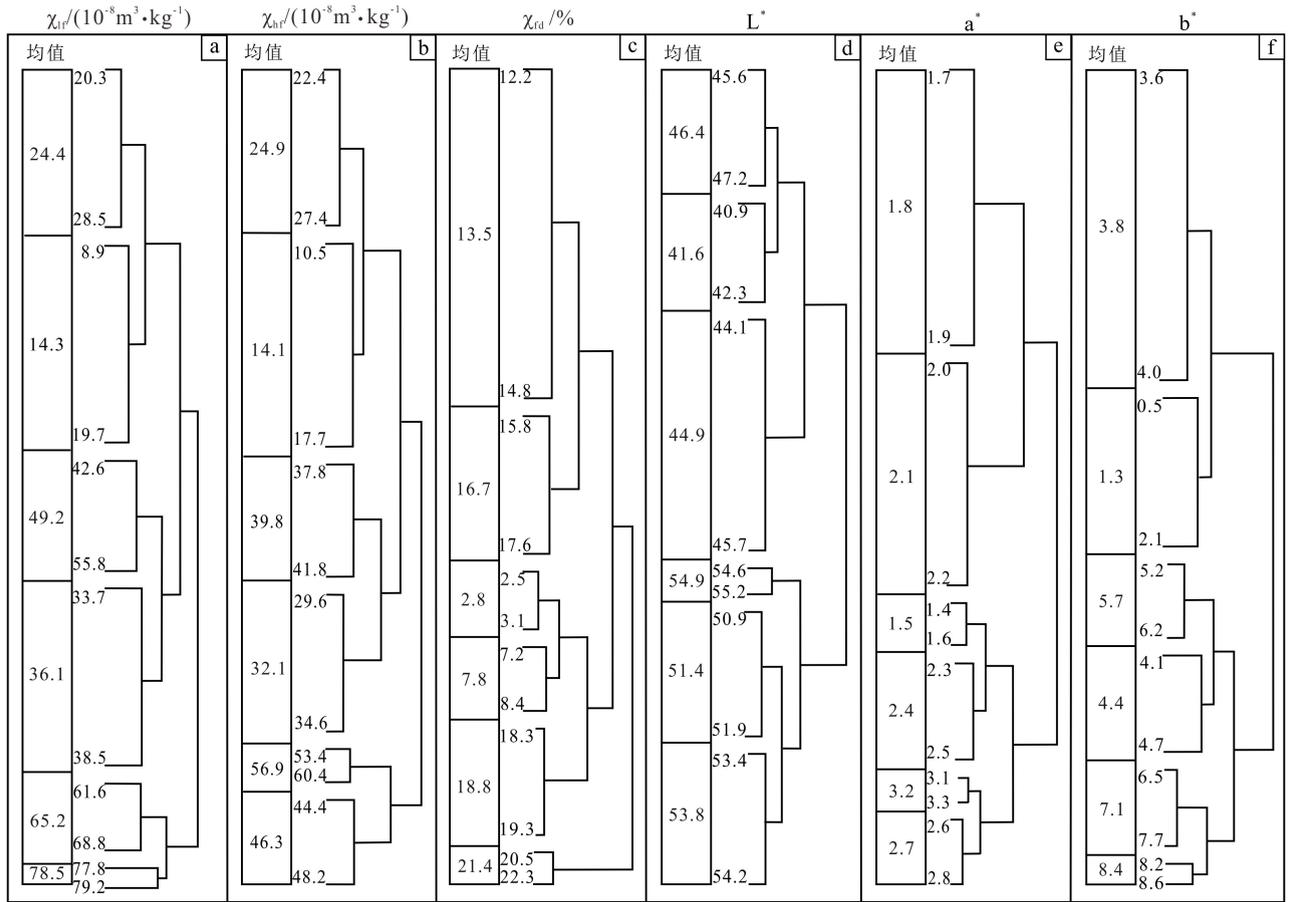
4 讨论分析

4.1 磁化率与色度对湖泊环境气候变化的响应机制

沉积物中的磁性记录易受陆源碎屑的输入与沉积后还原作用的影响,尤其是在湖泊及海洋沉积物中。Thompson 等^[32]认为湖泊沉积物磁性主要与外源磁性矿物供给有关,受湖泊内磁性矿物颗粒粗细控制,低频磁化率与高频磁化率受粗磁性颗粒控

制,频率磁化率受细磁性颗粒控制。在温暖湿润条件下,陆源供给足,湖相地层发育,沉积物粒度偏细,频率磁化率呈高值,低频磁化率与高频磁化率呈低值;相反在干冷气候下沉积物粒度偏粗,低频磁化率与高频磁化率呈高频率磁化率呈低值。

颜色是沉积物最为直观的特征,不同的气候条件都会对颜色产生直接影响,因此色度可以反映沉积物形成时期的气候与环境。对于湖泊沉积物来说,前人认为亮度 L^* 值主要受控于沉积物中的有机质与碳酸盐质量分数^[34-35,38]。Yang 等^[39]发现亮度 L^* 与有机质质量分数呈负相关,与碳酸盐质量分数呈正相关。暖湿条件下地表径流发育,陆源碎屑向湖盆带来了大量的营养物质,导致沉积物中有机质质量分数高,碳酸盐质量分数较少,于是亮度 L^* 为低值;干冷环境下碳酸盐易析出,有机质相对较少,于是亮度 L^* 为高值。湖泊沉积物红度 a^*



a. 低频磁化率聚类结果; b. 高频磁化率聚类结果; c. 频率磁化率聚类结果; d. L* 值聚类结果; e. a* 值聚类结果; f. b* 值聚类结果。

图 10 基于磁化率与色度数据的聚类分析过程示意图

Fig. 10 Schematic diagram of clustering analysis process based on magnetic susceptibility and chromaticity data

值受赤铁矿和针铁矿质量分数共同影响, 较高的 a* 值意味着样品更红, 表明了氧化铁质量分数的增加, 高值反映气候暖湿的气候特点。48b* 值一般与针铁矿质量分数呈正相关, 因此 b* 值也可以指示沉积物氧化还原程度, b* 值高代表湖泊沉积物受到的还原作用强, 气候温暖湿润, 因此 a* 和 b* 的高值反映气候湿热^[40-42]。

虽然色度与磁化率是易于获得的替代指标, 但是二者用来指示古气候与古环境存在一定的缺陷。对于固结成岩的岩石, 如果岩石自身经历了成岩作用与后期复杂的地质改造, 岩石原生色可能发生了一定的变化, 磁化率也会受自身磁性矿物转变而受一定影响。前人研究表明, 青山口组的碳优势指数 (CPI) 与姥鲛烷 (Pr) 与植烷 (Ph) 的比值不存

在相关性^[43], 轻重稀土元素之间存在分异作用, δEu 为弱正 Eu 异常、δCe 异常不明显^[44], 证明成岩环境稳定, 后期改造作用少。稳定的沉积环境与赋存条件说明青山口组二—三段色度与磁化率可以用于指示古气候变化。

4.2 青山口组二—三段气候演化规律

将聚类分析后的数据按均值大小分为干冷、较干冷、较暖湿与暖湿 4 个阶段, 并对各气候阶段分别赋值为 1、2、3、4 并取均值, 根据计算出的结果绘制出平均温度曲线 (图 11)。本文根据 Wu 等^[22]通过天文旋回分析和高精度的 U-Pb 锆石年代学, 确定青山口组二—三段沉积年龄为 90.435 ~ 86.010 Ma, 以此建立青山口组二—三段时间格架。

90.435 ~ 90.081 Ma, 气候变冷期。低频磁化率

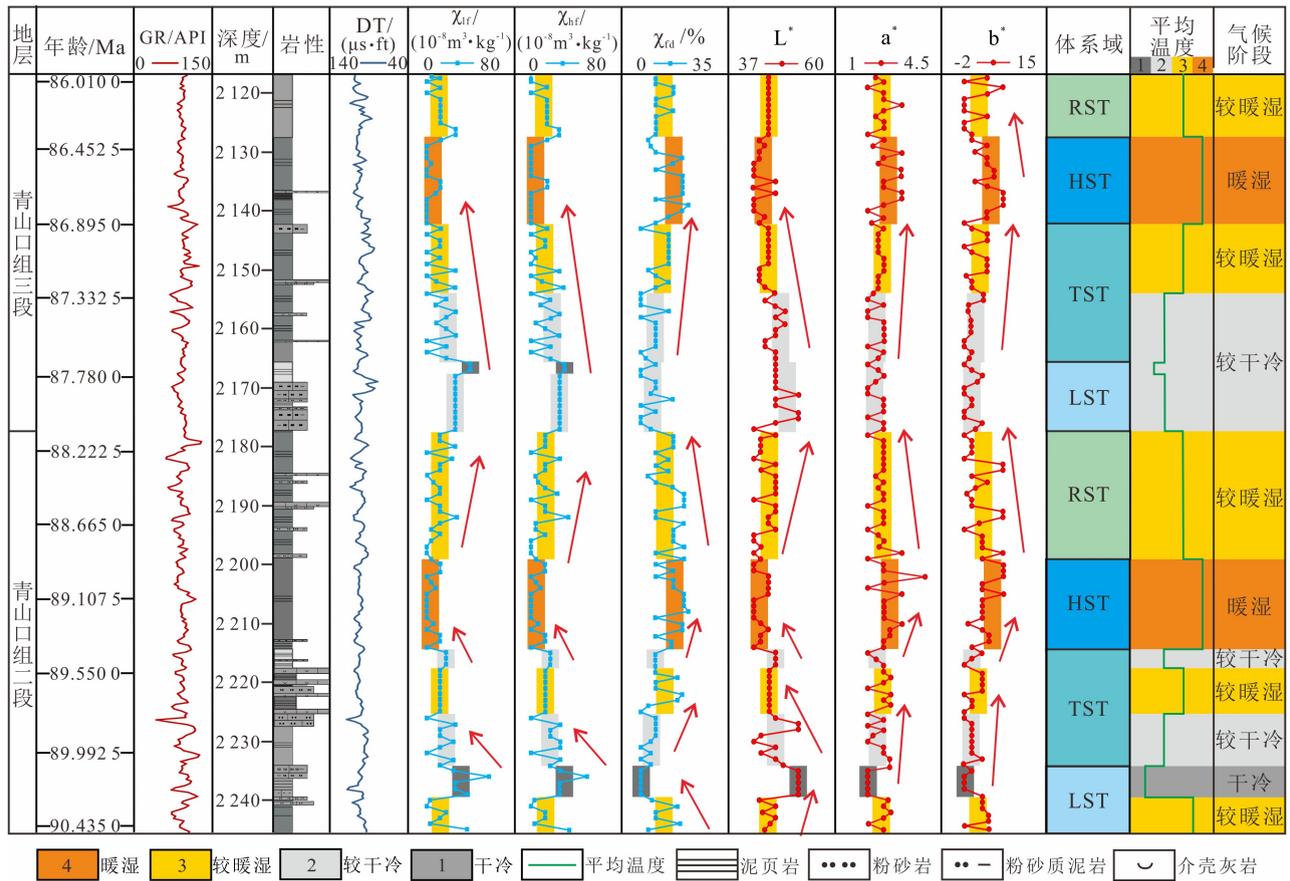


图 11 磁化率、色度反映的古温度变化与层序结构的关系图

Fig. 11 Relationship between paleotemperature variations (magnetic susceptibility and chromaticity) and sequence architecture

初始在 $24.292 \times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$ 左右波动，高频磁化率波动变化与低频磁化率基本相同，在 90.258 Ma 左右二者均值大幅度上升；低频与高频磁化率增大说明气温逐渐下降，物源由细粒物质逐渐过渡为粗粒物质，干凉动荡的环境不利于细磁铁颗粒的生成，粗磁性颗粒主导了磁化率值，频率磁化率因此降低。与之对应 L^* 值在 44.984 左右波动后上升至 53.914， a^* 值与 b^* 值变化趋势与 L^* 值相反，色度与磁化率共同表明该段气候由较湿热转变为干冷阶段。

90.081 ~ 88.931 Ma，气候变暖期。频率磁化率均值由 4.523% 逐渐上升至 16.147%；90.081 ~ 89.815 Ma 低频与高频磁化率波动幅度较大，说明水体较浅导致水体环境动荡，89.815 ~ 88.931 Ma 低频与高频磁化率波动幅度较小，且数据值逐渐下降，说明水体逐渐加深，在还原环境下沉积较多细

磁铁颗粒，指示气温逐渐上升。 a^* 值与 b^* 值整体呈升高趋势，且 a^* 值波动幅度更大，在 89.018 Ma 左右取得最大值 3.248。89.461 Ma 左右色度与磁化率值指示存在小幅度降温事件，各指标变化对应良好。总体认为此阶段前期为干凉动荡的水体环境，后期逐渐变的温暖湿润。

88.931 ~ 87.692 Ma，气温二次变冷期。88.931 ~ 89.136 Ma 低频与高频磁化率较上一阶段突然出现明显波动，频率磁化率均值出现明显负偏，说明水体环境动荡，气温在逐渐下降；89.136 ~ 87.780 Ma 低频与高频磁化率逐渐上升，且在 87.724 Ma 出现极大值。 L^* 均值由 41.754 逐渐上升至 44.984，在 88.251 Ma 左右最大值 53.902 频繁出现； a^* 值与 b^* 值逐渐下降，但 a^* 值变化波动较为平稳。总体认为此阶段前期为温暖湿润的气候，逐渐转变为干冷环境。

87.692 ~ 86.364 Ma, 气候二次变暖期。低频与高频磁化率波动明显且逐渐变小, 频率磁化率均值由 4.629% 逐渐增大到 16.279%, 反映温度在不断升高。L* 值变化趋势与 a* 值、b* 值呈对称关系, a* 值与 b* 值在 87.692 ~ 86.895 Ma 呈上升趋势, 在 86.895 ~ 86.364 Ma 均值达到最大且波动变化明显。推测 86.895 ~ 86.364 Ma 温度呈高值与缺氧事件有关 (LAEs), 其标志为海洋环境中大的地域范围里短期内 (< 1 Ma) 明显增强的有机碳 (TOC) 沉积阶段, 并往往与海洋和陆地沉积物中碳同位素的明显偏移相对应^[45], 同时伴随地表风化作用加强。前人将松科一南井碳同位素、TOC 数据与美国西部盆地已发现的碳同位素异常值对比发现^[46], 在松辽盆地内部也发生了缺氧事件, 并将这一事件定名为 LAEs。LAEs 是古湖泊局部碳循环变化引起的独立事件, 其机制为湖泊内硫酸盐含量的显著波动打破了原始的生物地球化学过程, 促进了古湖泊缺氧事件的形成^[47]。在 86.895 ~ 86.364 Ma 时期, 低频与高频磁化率为稳定低值, 频率磁化率值较高, 这是由于缺氧事件通常伴随着陆地风化作用加强, 水文循环加快, 大量的陆源粗碎屑物质被带入到湖泊中, 粗磁性颗粒的缓慢分解导致低频与高频磁化率的降低, 频率磁化率均值增加; 湖泊处于还原环境下, 所以 a* 与 b* 均值上升; 此时期 L* 值的下降是由于 LAEs 初期有机质短时间快速埋藏所致。

86.364 ~ 86.010 Ma, 气温下降期。这一阶段低频与高频磁化率变化基本相同, 均值较上一阶段略微上升, 频率磁化率由 16.279% 下降到 8.427%, 指示气温处于下降期; 与之相对应 a* 与 b* 均值均有不同程度下降, 反映气候由暖湿变为较暖湿。

总体来看, 可以根据磁化率与色度波动指示的气候意义将青山口组二—三段细分为 11 个气候阶段, 并且经历了变冷-变暖-变冷-变暖-变冷的气候变化过程。

4.3 古气候与层序的耦合关系

磁化率与色度数据揭示的 5 个主气候阶段与层序演化呈现显著耦合关系 (图 11)。

气候变冷期 (90.435 ~ 90.081 Ma): 低频与高频磁化率显著上升, 均值分别为 $63.057 \times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$ 和 $67.752 \times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$, 频率磁化率降低

至 4.523%, L* 值上升至 53.914, 指示气候处于变冷期, 粗颗粒物源输入增加, 且有碳酸盐析出。水循环减弱导致地表径流减少, 发育低水位体系域 (LST)。沉积物由大段泥岩转变为水下重力流沉积, GR 曲线呈指型或钟形, 界面发育冲刷面与重荷模构造, 反映季节性物源供给增强与气候驱动的湖退过程。

气候变暖期 (90.081 ~ 88.931 Ma): 频率磁化率逐渐升高至 16.147%, 低频与高频磁化率降低, 色度 a* 和 b* 值显著升高, 表明气候温暖湿润, 细粒沉积主导。地表径流增强, 形成湖泛期沉积 (TST-HST), 沉积物以半深湖-深湖相灰黑色页岩为主, 发育水平层理和介壳碎屑, GR 与 DT 测井曲线平直, 反映沉积环境较为稳定, 湖平面上升导致层序界面表现为退积序列。

气温二次变冷期 (88.931 ~ 87.692 Ma): 低频与高频磁化率再次升高, 均值分别为 $59.280 \times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$ 和 $66.894 \times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$, 色度 a* 和 b* 值降低, 表明气温逐渐降低, 粗碎屑供给量增加。湖平面缓慢萎缩, 发育水退体系域 (RST) 与低水位体系域 (LST), 沉积相由湖泊相演化为三角洲相, 沉积物由大段泥岩夹薄层粉砂岩与介壳灰岩过渡为粉砂质泥岩与灰白色泥岩, 水体深度相较于高水位期较低, 反映季节性径流增强与水体动荡。

气候二次变暖期 (87.692 ~ 86.364 Ma): 频率磁化率逐渐升高至 16.279%, 色度 L* 值下降, a* 与 b* 值分别达到峰值 3.16 与 10.64。结合 LAEs 缺氧事件, 反映气候温暖湿润且水文循环活跃。水循环加强形成水进体系域 (TST) 与高水位体系域 (HST)。此阶段早期沉积物以泥岩夹多套薄层砂岩为主, 晚期发育大段泥岩, 沉积亚相由半深湖相演变为深湖相。该段气候逐渐变暖, 温暖湿润的气候促使陆上河流广泛发育, 较好的水循环条件使水体变深, 沉积环境趋于稳定深水环境。

气温下降期 (86.364 ~ 86.010 Ma): 高频与低频磁化率同步抬升, 频率磁化率降至 8.427%, 色度 a* 与 b* 值下降, 揭示气候向干冷转变。此阶段湖平面再次下降, 发育水退体系域 (RST)。岩性由灰黑色泥岩变为深灰色泥岩, 指示沉积环境水体逐渐变浅, 沉积亚相应地由深湖相演变为半深湖相。

古气候波动通过调节水体循环与陆源物质输入量,控制层序结构分异。总体上,在相对干冷气候和水循环变差时期,沉积物以粗粒重力流沉积为主,形成低水位体系域与水退体系域;在温暖潮湿气候和水系充足时期,沉积物以细粒沉积为主,表现为水进体系域与高水位体系域;在气候转折期,湖平面升降速率变化导致沉积相快速切换,冲刷面、重荷模界面特征显著,能量团颜色突变。

5 结论

(1) 青山口组二—三段可划分为湖泊与三角洲两种沉积环境,并可细分为深湖泥、半深湖泥、介壳砂、浊积岩、前三三角洲泥、席状砂6种沉积微相。基于岩性、测井及小波变换分析,识别出2个完整三级层序,并细分为低位(LST)、水进(TST)、高位(HST)及水退(RST)体系域,揭示了高频气候振荡对陆相湖盆层序发育的显著控制作用。

(2) J2C井磁化率与色度数据指标表明,青山口组二—三段经历了变冷—变暖—变冷—变暖—变冷的旋回过程,其中,86.895~86.364 Ma的异常高温期与缺氧事件(LAEs)密切相关,其触发机制为水文循环加速导致的陆源粗碎屑输入与湖泊还原环境增强。

(3) 古气候通过调控水文循环与物源供给驱动层序分异,温暖湿润期,降水增强,沉积物以细粒泥岩为主,形成水进(TST)与高水位(HST)体系域;相对干冷期,水循环减弱,粗粒重力流沉积发育,对应低水位(LST)与水退(RST)体系域;气候转折期,湖平面升降速率变化引发沉积相快速切换,界面特征显著。

参考文献:

[1] XUAN J S, HAN S M, YU H L, et al. Subaqueous volcanic eruptive facies, facies model and its reservoir significance in a continental lacustrine basin: a case from the Cretaceous in Chaganhua area of southern Songliao Basin, NE China [J]. *Petroleum Exploration and Development Online*, 2023, 50 (4): 826–839.

[2] 赵玉茹, 高达, 胡明毅, 等. 古气候和海平面变化对浅水碳酸盐岩高频层序及有利储层的控制: 以川中地区龙王庙组为例 [J]. *中国地质*, 2024, 51 (2): 577–591.

ZHAO Y R, GAO D, HU M Y, et al. Controls of paleoclimate and sea-level changes on the high-frequency sequence of shallow-water carbonates: a case study of the Longwangmiao Formation in the central Sichuan Basin [J]. *Geology in China*, 2024, 51 (2): 577–591.

[3] HOU S, JIANG Y L, ZENG T. High resolution sequence stratigraphy framework and quality reservoir distribution of the Xujiahe Formation in the Upper Triassic, Northeast Sichuan [J]. *Doklady Earth Sciences*, 2025, 520 (2): 42.

[4] 刘招君, 董清水, 郭巍, 等. 陆相层序地层学理论与应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 47–50.

LIU Z J, DONG Q S, GUO W, et al. Continental sequence stratigraphy: an introduction and its applications [M]. Beijing: Petroleum Industry Publishing House, 2002: 47–50.

[5] 钟寿康, 谭秀成, 胡广, 等. 古地理格局对膏盐岩—碳酸盐岩共生体系沉积分异的控制: 以鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组五段6亚段为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49 (4): 728–740.

ZHONG S K, TAN X C, HU G, et al. Control of paleogeographic pattern on sedimentary differentiation of evaporite-carbonate symbiotic system: a case study of the sixth sub-member of Ordovician Majiagou Formation M5 Member in central-eastern Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49 (4): 728–740.

[6] XU X T, SHAO L T, FU Y F, et al. Sequence palaeogeography, lacustrine basin evolution, and coal accumulation in the Lower Cretaceous Fuxin continental faulted basin, China [J]. *Geological Journal*, 2020, 55 (2): 1195–1215.

[7] 姜高磊, 王乃昂, 李卓仑, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊表层沉积物盐类矿物分布及对气候环境的指示 [J]. *中国地质*, 2024, 51 (6): 2077–2089.

JIANG G L, WANG N A, LI Z L, et al. Distribution pattern of saline minerals in surface sediments of lakes in the Badain Jaran Desert and its implications for climate environmental reconstruction [J]. *Geology in China*, 2024, 51 (6): 2077–2089.

[8] MOREAU K, ANDRIEU S, BRIAIS J, et al. Facies distribution and depositional cycles in lacustrine and palustrine carbonates: the Lutetian–Aquitania record in the Paris Basin [J]. *Depositional Record*, 2023, 10 (1): 124–158.

[9] 王向东, 王任, 石万忠, 等. 中国东部典型裂谷盆地构造活动特征及演化: 以松辽盆地孤店断陷为例

- [J]. 地质科技通报, 2022, 41 (3): 85-95.
- WANG X D, WANG R, SHI W Z, et al. Tectonic characteristics and evolution of typical rift basins in eastern China: a case study in the Gudian area, Songliao Basin [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41 (3): 85-95.
- [10] 汪涛涛, 纪文明, 李耀华, 等. 松辽盆地齐家—古龙凹陷青山口组一段页岩岩相类型及孔隙发育特征 [J]. 地质科学, 2025, 60 (1): 62-77.
- WANG T T, JI W M, LI Y H, et al. Petrographic types and pore development characteristics of shales in the first member of Qingshankou Formation, Qijia-Gulong Sag, Songliao Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2025, 60 (1): 62-77.
- [11] 庞小娇, 王贵文, 匡立春, 等. 沉积环境控制下的页岩岩相组合类型及测井表征: 以松辽盆地古龙凹陷青山口组为例 [J]. 古地理学报, 2023, 25 (5): 1156-1175.
- PANG X J, WANG G W, KUANG L C, et al. Logging evaluation of lithofacies and their assemblage under control of sedimentary environment: a case study of the Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2023, 25 (5): 1156-1175.
- [12] 蔡希源, 辛仁臣. 湖平面相对升降对断陷湖盆充填过程影响的数值模拟 [J]. 地球科学, 2004, 17 (5): 539-542.
- CAI X Y, XIN R C. Numerical simulation on filling process of faulted basin in response to lake-level change [J]. Earth Science, 2004, 17 (5): 539-542.
- [13] WANG J, BAO Z D, WANG Y L. High-resolution sequence stratigraphy and sedimentary characteristics of the Member 3 of Qingshankou Formation of Upper Cretaceous in Qian'an area, south Songliao Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19 (2): 327-340.
- [14] FENG Y L, YANG Z, ZHU J C, et al. Sequence stratigraphy in post-rift river-dominated lacustrine delta deposits: a case study from the Upper Cretaceous Qingshankou Formation, northern Songliao Basin, northeastern China [J]. Geological Journal, 2021, 56 (1): 316-336.
- [15] 白悦悦, 王灼, 孙平昌, 等. 温室背景下陆相抚顺盆地始新世西露天组古气候演化 [J]. 地球学报, 2022, 43 (6): 917-924.
- BAI Y Y, WANG Z, SUN P C, et al. Paleoclimate evolution of the Eocene Xiloutian Formation in the continental Fushun Basin in the warm house background [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2022, 43 (6): 917-924.
- [16] WESTERHOLD T, MARWAN N, ANNA J, et al. An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years [J]. Science, 2020, 369 (65): 1383-1387.
- [17] WAN J, YU Z, YUAN Y, et al. Laminae in multiple lithofacies and impact on pore structures in lacustrine shale: the cretaceous Qingshankou Formation, Songliao Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2025, 174 (9): 107321.
- [18] WU F Y, SUN D, LI H, et al. The nature of basement beneath the Songliao Basin in NE China: geochemical and iso-topic constraints [J]. Physics and Chemistry of the Earth (Part A: Solid Earth and Geodesy), 2001, 26 (9/10): 793-803.
- [19] 代宇, 谭静强, 谢文泉. 松辽盆地中央凹陷青山口组一段页岩生烃潜力及沉积环境研究 [J]. 非常规油气, 2022, 9 (5): 9-24.
- DAI Y, TAN J Q, XIE W Q. Study on hydrocarbon generation potential and sedimentary environment of shale in the first member of Qingshankou Formation in central depression of Songliao Basin [J]. Unconventional Oil & Gas, 2022, 9 (5): 9-24.
- [20] WU H C, ZHANG S H, JIANG G Q, et al. 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, 2009, 278 (3/4): 308-323.
- [21] HE H Y, DENG C L, WANG P J, et al. Toward age determination of the termination of the Cretaceous Normal Superchorn [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2012, 13 (2): 259-262.
- [22] WU H C, ZHANG S H, JIANG G Q, et al. Astrochronology of the 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, 2013, 385 (3): 55-70.
- [23] 姚玉来, 肖飞, 李士超, 等. 松辽盆地齐家凹陷南部青山口组一段古环境及其对有机质富集的控制作用 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2025, 49 (1): 59-71.
- YAO Y L, XIAO F, LI S C, et al. Paleoenvironment of the first member of Qingshankou Formation in southern Qijia Sag, Songliao Basin and its control on enrichment

- of organic matter [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2025, 49 (1): 59–71.
- [24] 付秀丽, 李军辉, 郑强, 等. 松辽盆地北部青山口组富烃页岩形成环境与成因 [J]. *世界地质*, 2024, 43 (1): 19–36.
FU X L, LI J H, ZHENG Q, et al. Formation environment and origin of hydrocarbon-rich shales in Qingshankou Formation, northern Songliao Basin [J]. *World Geology*, 2024, 43 (1): 19–36.
- [25] 黄清华, 郑玉龙, 杨明杰, 等. 松辽盆地白垩纪古气候研究 [J]. *微体古生物学报*, 1999, 16 (1): 99–107.
HUANG Q H, ZHANG Y L, YANG M J, et al. On Cretaceous paleoclimate in the Songliao Basin [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 1999, 16 (1): 99–107.
- [26] 何文渊, 蒙启安, 付秀丽, 等. 松辽盆地古龙凹陷青山口组页岩沉积环境特征及其有机质富集机理 [J]. *沉积学报*, 2022, 40 (1): 1–21.
HE W Y, MENG Q A, FU X L, et al. Geochemical study of the sedimentary environment and its organic matter enrichment mechanism in Qingshankou Formation shale, Gulong Sag, Songliao Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40 (1): 1–21.
- [27] 尹秀珍, 万晓樵, 司家亮. 松辽盆地 G-12 井晚白垩世青山口组沉积时期古湖泊学替代指标分析 [J]. *地质学报*, 2008, 87 (5): 676–682.
YIN X Z, WAN X J, SI J L. Analysis of paleolimnological proxy indicators during the Late Cretaceous Qingshankou Formation depositional period in Well G-12, Songliao Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 87 (5): 676–682.
- [28] 周亚伟, 杜玉洪, 谢俊, 等. INPEFA 技术与小波变换在层序地层划分中的应用与对比: 以饶阳凹陷大王庄地区东营组三段为例 [J]. *中国科技论文*, 2021, 16 (5): 494–501.
ZHOU Y W, DU Y H, XIE J, et al. Application and comparison of INPEFA technique and wavelet transform in sequence stratigraphic division: a case study in the third member of Dongying Formation in Dawangzhuang area, Raoyang Sag [J]. *China Science Paper*, 2021, 16 (5): 494–501.
- [29] 邵才瑞, 王萌, 昌伦杰, 等. 应用测井资料小波变换与伪成像技术精细划分深部隔夹层 [J]. *新疆石油地质*, 2024, 45 (5): 611–621.
SHAO C R, WANG M, CHANG L J, et al. Application of logging data wavelet transform and pseudo-imaging to fine division of deep barrier/interlayer [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2024, 45 (5): 611–621.
- [30] 陈思民, 朱建伟, 孟庆涛. 基于地震资料的多尺度小波变换识别沉积旋回技术 [J]. *世界地质*, 2021, 40 (1): 140–145.
CHEN S M, ZHU J W, MENG Q T. Identification of sedimentary cycles using multi-scale wavelet transform based on seismic data [J]. *Global Geology*, 2021, 40 (1): 140–145.
- [31] DAS S, VENKATESHWARLU M, MONDAL S, et al. Anisotropy of magnetic susceptibility and rock magnetism of high-grade rocks from eastern Ghats Mobile Belt, India: constraints to tectonics [J]. *Journal of Earth System Science*, 2024, 133 (3): 175.
- [32] THOMPSON R, BLOEMENDAL J, DEARING J, et al. Environmental applications of magnetic measurements [J]. *Science*, 1980, 101 (30): 481–486.
- [33] HAO X, LIU C C, ZHANG H P, et al. Reconstruction of paleowind direction in the Qinghai Lake area during the last deglacial: insights from anisotropy of magnetic susceptibility [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2024, 650 (1): 112351.
- [34] SU Y X, ZHANG X R, ZHANG S, et al. Relationship between the size composition observed from the photo-sedimentation technique and chromaticity of the fine-grained surface sediments from the modern lakes, Songnen Plain [J]. *IOP Conference Series (Earth and Environmental Science)*, 2022, 1087 (1): 012081.
- [35] TANNER H, LUCAS G. Record of paleoclimate across the Cretaceous–Paleogene boundary from paleosols in the west-central San Juan Basin, New Mexico, USA [J]. *The Depositional Record*, 2023, 9 (4): 1131–1152.
- [36] ALAN R, ROBERTSON T. The CIE 1976 color-difference formulae [J]. *Color Research & Application*, 1977, 2 (1): 7–11.
- [37] 李凯丰, 王浩全, 侯清. 基于小波分析联合 VMD 的超声信号去噪方法研究 [J]. *中国测试*, 2023, 49 (4): 52–59.
LI K F, WANG H Q, HOU Q. Combined wavelet analysis and VMD for ultrasonic signal denoising: a methodological approach [J]. *China Measurement & Test*, 2023, 49 (4): 52–59.
- [38] WANG Z, SUN P C, DU J F, et al. Eocene paleoclimate evolution under the background of warmhouse-hothouse conditions in the continental Fushun Basin: implications from magnetic susceptibility and color

- reflectance [J]. *ACS Omega*, 2022, 7 (28): 24614–24625.
- [39] YANG S L, FANG X M, LI J J, et al. Transformation functions of soil color and climate [J]. *Science in China (Ser. D)*, 2001, 44 (1): 218–226.
- [40] HELMKE J, SCHULZ M, BAUCH H. Sediment-color record from the northeast Atlantic reveal patterns of millennial-scale climate variability during the past 500 000 years [J]. *Quaternary Research*, 2002, 33 (57): 49–57.
- [41] 宋春晖, 白晋锋, 赵彦德, 等. 临夏盆地 13 ~ 4.4 Ma 湖相沉积物颜色记录的气候变化探讨 [J]. *沉积学报*, 2005, 23 (3): 507–513.
- SONG C H, BAI J F, ZHAO Y D, et al. Climate change exploration of color records of lacustrine sediments from 13 to 4.4 Ma in the Linxia Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23 (3): 507–513.
- [42] 平帅飞. 依舒地堑依兰地区始新世古环境演化研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- PING S F. A study on the evolution of paleoenvironments during the Eocene in the Yishu Graben, Yilan Region [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [43] 孙平昌. 桦甸盆地古近系桦甸组沉积特征研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- SUN P C. A study on the sedimentary characteristics of the Huadian Formation (Paleogene System) in the Huadian Basin [D]. Changchun: Jilin University, 2010.
- [44] 李鑫石. 松辽盆地讷河地区青山口组及姚家组岩石地球化学特征 [J]. *甘肃科技*, 2019, 35 (1): 50–52.
- LI X S. Geochemical characteristics of the Qingshankou and Yaojia formations in the Songliao Basin, Nehe County [J]. *Gansu Science and Technology*, 2019, 35 (1): 50–52.
- [45] 李雪霜, 张坦, 马超. 白垩纪大洋缺氧事件 2 (OAE2) 的天文年代学研究 [J]. *第四纪研究*, 2023, 43 (6): 1597–1613.
- LI X S, ZHANG T, MA C. Astrochronological comparative study of Cretaceous Oceanic Anoxic Event2 (OAE2) [J]. *Quaternary Sciences*, 2023, 43 (6): 1597–1613.
- [46] JONES M, IBARRA D E, GAO Y, et al. Evaluating Late Cretaceous OAEs and the influence of marine incursions on organic carbon burial in an expansive East Asian paleo-lake [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2018, 484 (4): 41–52.
- [47] HAN S, CAO W T, HE F J, et al. Integrated chemostratigraphy ($\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{34}\text{S}$ – $\delta^{15}\text{N}$) constrains Cretaceous lacustrine anoxic events triggered by marine sulfate input [J]. *Chemical Geology*, 2021, 559 (1): 109–112.