

松辽盆地乾安地区上白垩统四方台组沉积物色度和磁化率约束的古气候变化

马培淞^{1,2,3}, 焦阳⁴, 方石^{1,2,3*}, 卢天军⁵, 刘鑫⁵, 何春生⁵

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061;
2. 吉林省油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. 吉林大学 保卫处, 长春 130012;
5. 内蒙赤峰市核工业二四三大队, 内蒙古 赤峰 024000

摘要: 为深入揭示松辽盆地四方台组古气候特征, 推断气候变化的控制因素, 完善气候演化蕴藏的信息, 本文对乾安地区 ZKQA1-1 井 140.0~380.5 m 岩心进行了磁化率和色度测试。皮尔逊相关性分析发现, 磁化率和色度数据与地层深度相关性较弱, 亮度 L^* 与红度 a^* 和黄度 b^* 呈负相关, 红度 a^* 与黄度 b^* 呈正相关, 显示数据受后期成岩作用影响很小, 具有可靠的古气候指示意义。通过 spss 聚类分析, 分别将高频磁化率、低频磁化率、频率磁化率、亮度 L^* 、红度 a^* 和黄度 b^* 进行一次滤波处理, 每种数据得到 4 个滤波均值; 并将滤波后的数值根据古气候替代指标指示情况分为冷干、较冷干、较暖湿和暖湿 4 种气候类型。为避免磁化率和色度数据在半定量分析气候类型过程中产生误差, 对 6 组数据代表的气候类型分别进行赋值处理 (冷干 0.5, 较冷干 1.5, 较暖湿 2.5, 暖湿 3.5), 根据深度求和取均值并结合岩性和测井资料在时间尺度上综合分析。结果显示: ZKQA1-1 井四方台组岩心磁化率和色度数据指示 Campanian 中期 76.08~75.65 Ma 时期为较冷干气候, 此阶段的古温度降低与赤道辐合带迁移响应; Campanian 中晚期 75.65~74.32 Ma 时期为较暖湿-暖湿气候, 在 75.55 Ma 出现古温度极高值, 而 75.55~74.32 Ma 的古温度略下降与 Campanian 中晚期的 CMBE 气候事件响应; Campanian 晚期, 74.32~73.19 Ma 时期为冷干-较冷干气候, 73.19~72.86 Ma 时期为较暖湿气候, 在 74.13 Ma 出现古温度的极低值, 此阶段 74.13~72.86 Ma 的古温度上升可能与 Campanian 晚期的德干玄武岩喷发事件前夕间歇性火山活动响应。总体来看四方台组古气候与全球气候响应良好, 为相对温暖干燥的气候类型。

关键词: 晚白垩世; 古气候; 磁化率; 色度; 四方台组; 松辽盆地

收稿日期/Received: 2024-06-17; 修订日期/Revised: 2025-03-19; 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: 马培淞 (2000—), 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: 154592128@qq.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.

Paleoclimate changes documented by magnetic and chromatic characteristics from Upper Cretaceous Sifangtai Formation in Qian'an area, Songliao Basin

MA Peisong^{1,2,3}, JIAO Yang⁴, FANG Shi^{1,2,3}*, LU Tianjun⁵, LIU Xin⁵, HE Chunsheng⁵

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. Security Office, Jilin University, Changchun 130012, China;

5. Inner Mongolia Chifeng City Nuclear Industry Brigade 243, Chifeng 024000, Inner Mongolia, China

Abstract: To deeply reveal the paleoclimate characteristics of the Sifangtai Formation in the Songliao Basin, infer the controlling factors of climate change, and improve the information implied by climatic evolution, magnetic susceptibility and chromaticity tests were conducted on the core (140.0–380.5 m) from the ZKQA1–1 in the Qian'an area. Through Pearson correlation analysis, it was found that magnetic susceptibility and chromaticity data were weakly correlated with stratigraphic depth. Brightness (L^*) was negatively correlated with redness (a^*) and yellowness (b^*), while redness (a^*) was positively correlated with yellowness (b^*), indicating that the data were minimally affected byagenesis and had reliable paleoclimate significance. Through SPSS cluster analysis, high-frequency magnetic susceptibility, low-frequency magnetic susceptibility, frequency-dependent magnetic susceptibility, brightness (L^*), redness (a^*), and yellowness (b^*) were filtered once, and four filtered mean values were obtained for each dataset. The filtered values were classified into four climatic types (cold-dry, relatively cold-dry, relatively warm-wet, and warm-wet) based on paleoclimate proxy indicators. To avoid errors caused by semi-quantitative analysis of climatic types using magnetic susceptibility and chromaticity data, the six datasets representing climatic types were assigned numerical values (cold-dry: 0.5, relatively cold-dry: 1.5, relatively warm-wet: 2.5, warm-wet: 3.5), averages were calculated based on depth summation, and comprehensive temporal-scale analysis was performed in combination with lithological and well-log data. The results showed that the magnetic susceptibility and chromaticity data of the Sifangtai Formation core from the Well ZKQA1–1 indicated a relatively cold-dry climate during the mid-Campanian (76.08–75.65 Ma), and the paleotemperature decrease in this stage was associated with the migration of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ). A relatively warm-wet to warm-wet climate was identified during the mid-late Campanian (75.65–74.32 Ma), with an extreme paleotemperature peak observed at 75.55 Ma, while the slight paleotemperature decline from 75.55 to 74.32 Ma was linked to the Campanian–Maastrichtian Boundary Event (CMBE). During the late Campanian (74.32–73.19 Ma), a cold-dry to relatively cold-dry climate was recorded, with an extreme paleotemperature minimum at 74.13 Ma, followed by a relatively warm-wet climate from 73.19 to 72.86 Ma, and the paleotemperature rise from 74.13 to 72.86 Ma might be related to intermittent volcanic activity prior to the late Campanian Deccan Traps eruption event. Overall, the paleoclimate of the Sifangtai Formation was demonstrated to correspond well with global climate trends, representing a relatively warm and dry climatic type.

Keywords: Late Cretaceous Paleoclimate; magnetic susceptibility; chromatic; Sifangtai Formation; Songliao Basin

0 引言

气候演变研究是白垩纪生物快速更替和地球环境之间耦合关系研究的一个重要切入点^[1-2]。在这一研究中, 尽管沉积学、古生物学、地层学、岩石矿物学、地球化学、年代学等的综合使用大大提高了人们对白垩纪古环境变迁的认识, 但各种假说之间的争议一直存在。探索新的古气候指标, 以增加古气候演变的证据, 对于进一步加强白垩纪地球环境的认识具有重要的科学理论意义。

松辽盆地是中国最大的白垩纪陆相含油气盆地, 白垩纪地层发育广泛且完整^[2]。20 世纪 90 年代, 张立平等^[3]、高瑞祺^[4]、黄清华等^[5]通过孢粉、同位素等手段对松辽盆地的古气候开展了研究, 认为该时期古气候整体呈暖-冷-暖的变化趋势。21 世纪以来, 白垩纪古气候古环境研究取得了一系列成果^[6-9], 发现白垩纪古气候变化从泉头组到青山口组为一个“干热→温湿→干热”旋回, 姚家组到嫩江组为一个“干热→温湿→干热”旋回, 从四方台组到明水组古气候变化为一个“温湿→干热→温湿”旋回。这为松辽盆地和全球白垩纪古气候古环境研究提供了重要数据, 但分辨率较低, 多指标、高精度的古气候研究仍待加强。

沉积物色度和磁化率在指示古温度、古降水方面表现出潜在优势, 在气候变化研究中具有广泛的应用前景。Wang 等^[10]运用磁化率和色度数据较为精准地识别出了早始新世一系列的极热事件。Peck 等^[11]发现在温暖湿润条件下, 陆源供给充足, 湖相地层发育, 沉积物粒度偏细, 低频磁化率值呈低值, 频率磁化率呈高值; 相反在冷干气候下低频磁化率值为高值, 频率磁化率为低值。方大钧等^[12]对中国松辽盆地白垩系从沙河子组至嫩江组的岩石进行磁化率系统测试, 发现松辽盆地白垩纪气候的变化与全球气候事件高度吻合, Fernandez 等^[13]通过对土壤颜色的研究发现色度指标中的红度 a^* 和黄度 b^* 的高值反映暖湿的气候状况, 低值反映冷干气候, 平帅飞^[14]和张新荣等^[15]通过对松嫩平原沉积物色度研究发现 b^* 值和 a^* 值二者具有较好的相关性, 较高的 b^* 值指示湿热的气候条件, 低值指示相对干凉的气候条件。较之其他手段, 色度和磁化率更为方便快捷, 受到学界的重视。

目前松辽盆地四方台组的连续厚层沉积对重建

白垩纪古气候有得天独厚的优势, 但目前该组的研究主要集中在该时段的岩石学特征^[16-17]和沉积特征^[18-19]等方面, 对古温度的波动及古气候的演化过程厘定尚未展开。笔者通过相关性分析、聚类分析等数据分析手段, 结合岩性、测井数据, 探讨了沉积物色度和磁化率在四方台组古气候研究过程中的潜力, 在此基础上半定量解析了四方台组古气候演化过程, 揭示了四方台组各阶段气候演化与全球气候事件的关系, 为探寻该时段古气候控制因素提供了新的视角和科学依据。

1 研究背景

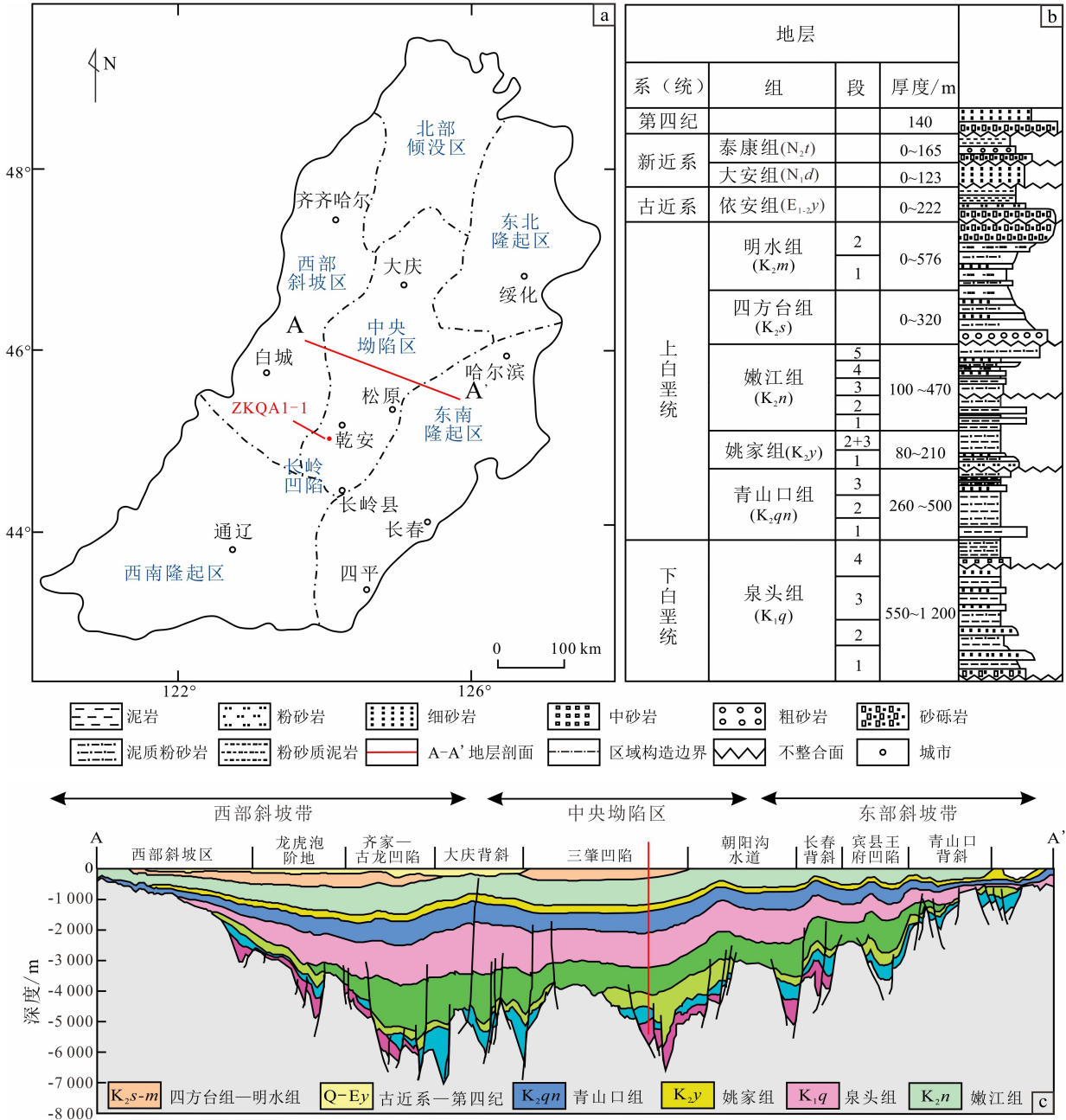
1.1 区域地质概况

松辽盆地位于中国东北地区 ($119^{\circ}40' \sim 128^{\circ}24' E$, $42^{\circ}25' \sim 49^{\circ}23' N$), 整体呈北东向展布, 是晚中生代开始形成的大型陆相沉积盆地, 也是世界上规模较大的含油气盆地^[20]。乾安地区位于松辽盆地中部, 隶属于盆地中央拗陷带南部的长岭凹陷, 历经早中侏罗世的前裂谷期、晚侏罗世至早白垩世初期裂谷期、晚白垩世早中期的沉降拗陷期以及晚白垩世的幕式构造反转构造期^[21-23], 到晚白垩世四方台组时期^[24-25], 本区作为沉积中心之一, 沉积了一套曲流河沉积、三角洲沉积和浅湖沉积^[26-28]: 下部为一套砖红色、灰色、灰绿色含细砾砂岩和中砂岩、泥岩夹棕灰色泥质粉砂岩, 呈正韵律; 中部为一套灰白、灰色细砂岩, 粉砂岩, 泥质粉砂岩与砖红、紫红色泥岩互层; 上部则为沉积红色、紫红色泥岩, 夹少量灰白、灰绿色粉砂岩或泥质粉砂岩, 且由下至上粒度逐渐变细。

松科 1 井研究结果显示松辽盆地四方台组涵盖时段为 $79.1 \sim 72.2 \text{ Ma}$ ^[2], 黄清华等^[29]基于岩石、生物、磁性和年代地层学成果, 认为四方台组对应中晚 Campanian 期, 国际地层年表中 Campanian 的时间界限为 $(83.6 \pm 0.5 \text{ Ma}) \sim (72.1 \pm 0.2 \text{ Ma})$ ^[30-31] (图 1)。

1.2 古气候研究现状

在松辽盆地的古气候变化研究方面, 许多学者做了大量工作。方大钧等^[12]利用岩石磁化率、剩磁强度等资料对松辽盆地白垩纪古气候进行研究, 编制了松辽盆地白垩纪磁化率相对变化曲线与用同位素方法得出的古海水温度变化曲线对比图, 阐述了松辽盆地白垩纪气候变化的脉动规律及其与全球



a. 松辽盆地坳陷层单元划分及研究区位置; b. 松辽盆地地层综合柱状图; c. A-A' 地层剖面。

据参考文献 [30, 32] 修改。

图 1 松辽盆地乾安地区地质概况图

Fig. 1 Geological overview of Qian'an area in Songliao Basin

性升温、降温事件发生的同步性。张立平等^[3]根据氧同位素和孢粉资料，认为松辽盆地嫩江组末期降温，四方台组时期暖干，明一段温暖潮湿。黄清华等^[5]通过孢粉研究，发现松辽盆地晚白垩世古气候

总体为潮湿—半干旱气候，其中四方台组与嫩江组沉积时期有了质的区别。四方台组中的希指蕨孢含量在整个白垩纪达到最高，表现为比较干燥的气候。徐增连等^[33]根据元素地球化学特征，将松辽盆地的

晚白垩世划分为① 干旱-炎热型; ② 半干旱-炎热型; ③ 潮湿-炎热型; ④ 温暖-潮湿型; ⑤ 温寒-高寒型 5 种气候类型, 其中从四方台组到明水组古气候变化为一个“温湿→干热→温湿”旋回。

2 样品选取与实验方法

2.1 样品选取

本文岩心来源于核工业 ZKQA1-1 井 140.0 ~ 380.5 m, 下部为灰色、紫红色泥岩, 夹灰色、灰绿色细砂岩; 上部以灰绿色细中砂岩为主, 夹紫红色泥岩、灰色细中砂岩、砂质砾岩, 沉积连续(图 2)。结合区域地层特征, 综合对比分析可知, 研究层段属于四方台组。对该层段以 25 cm 垂直间距取样, 共取得样品 963 个, 对样品进行粉碎, 过 200 目筛后, 在吉林大学油页岩共生实验室测得磁化率和色度数据。

2.2 磁化率测试

磁化率是物质在外界磁场作用下被磁化的难易程度。沉积物磁化率的大小除与组成有关外, 还受沉积环境、有机质产率和气候条件的影响, 一般温度较低或有机质含量较高时, 磁化率较低^[11]。本文称量 6 g 过筛样品, 装入 2 cm × 2 cm × 2 cm 的无磁性样品盒后, 使用英国 Bartington 公司生产的 MS2B 磁化率仪, 采用 Magnetic Susceptibility System 系统测得各样品的磁化率。每个样品测量 3 次后取平均值。

2.3 色度测试

色度是沉积物最直观的颜色特征, 一般受铁氧化物、碳酸盐、有机质、氧化还原条件、粒度的影响而指示环境特征^[34]。本文参照 1976 年国际照明委员会规定的 CIELAB 颜色表达和测量系统, 采用 L* 值(亮度, 其中 L* = 0% 表示黑色, L* = 100% 表示白色)、a* 值(红度, 其中正值偏向红色, 负值偏向绿色)和 b* 值(黄度, 其中正值偏向黄色, 负值偏向蓝色)3 个值来反映色度特征。实验选用 WR-18 色差仪(采用 CIED65 标准光源, 孔径为 4 mm)进行色度测量。每个样品测试 3 次, 取均值。

3 数据展布特征

3.1 磁化率

ZKQA1-1 井低频磁化率值(χ_{lf})与高频磁化率

值(χ_{hf})波动幅度变化明显, 低频磁化率与高频磁化率变化范围分别为 $(9.70 \sim 66.10) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $(8.20 \sim 62.30) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 井深 140.0 ~ 290.0 m 时二者数值波动性较强, 数值陡缓变化趋势明显。在井深 196.5 m 时低频磁化率与高频磁化率出现极大值, 分别为 $66.10 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $62.30 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 在井深 213.5 m 时出现二者出现极低值, 分别为 $9.70 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $8.20 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。井深 290.0 ~ 308.5 m 时低频磁化率与高频磁化率波动性较顶部减弱, 数值陡缓变化趋势较顶部不明显; 频率磁化率(χ_{fd})整体波动幅度变化明显, 变化范围主要在 3.10% ~ 28.30%。在井深 202.0 ~ 216.0 m、276.0 ~ 282.0 m 和 346.0 ~ 350.0 m 分别出现频率磁化率较低偏移值, 分别对应 4.78%、2.30% 和 9.26%。278.0 ~ 280.0 m 和 319.0 ~ 321.0 m 分别出现频率磁化率较高偏移值, 分别对应 68.10% 和 60.80% (图 2)。

3.2 色度

ZKQA1-1 井亮度 L* 值自四方台组顶部到底部整体呈逐渐减小的趋势, 波动变化明显, 变化范围为 42 ~ 71。井深 140.0 ~ 244.0 m 时 L* 为相对高值, 波动性较强, 158.0 m 时出现极大值 71。井深 244.0 ~ 380.5 m 时 L* 为相对低值, 波动性较弱, 347.0 m 时出现极小值 42。红度 a* 值和黄度 b* 值整体波动性较强, 与 L* 值波动趋势相似, 井深 255.0 ~ 380.5 m 时红度 a* 和黄度 b* 为相对高值, 井深 140.0 ~ 255.0 m 时红度 a* 和黄度 b* 为相对低值。综合来看亮度 L* 值与红度 a* 值和黄度 b* 值呈很强的负相关性(图 2)。

4 数据分析

4.1 相关性分析

为确定数据应用的可靠性, 分别对深度与磁化率、色度数据和色度(L* 值, a* 值, b* 值)3 种指标进行相关性分析(图 3)。其中深度与频率磁化率, 低频磁化率和高频磁化率的皮尔逊相关系数分别为 0.049 9, 0.098 2 和 0.089 1, 深度与亮度 L*, 红度 a* 和黄度 b* 的皮尔逊相关系数分别为 -0.102 3, 0.091 3 和 0.098 4, 均趋近于 0, 说明磁化率和色度数据不受成岩作用影响, 可以反映在时间尺度上古气候的演化特征(图 3a ~ f)。一般沉积物亮度 L 代表碳酸盐或有机质含量的相对高低,

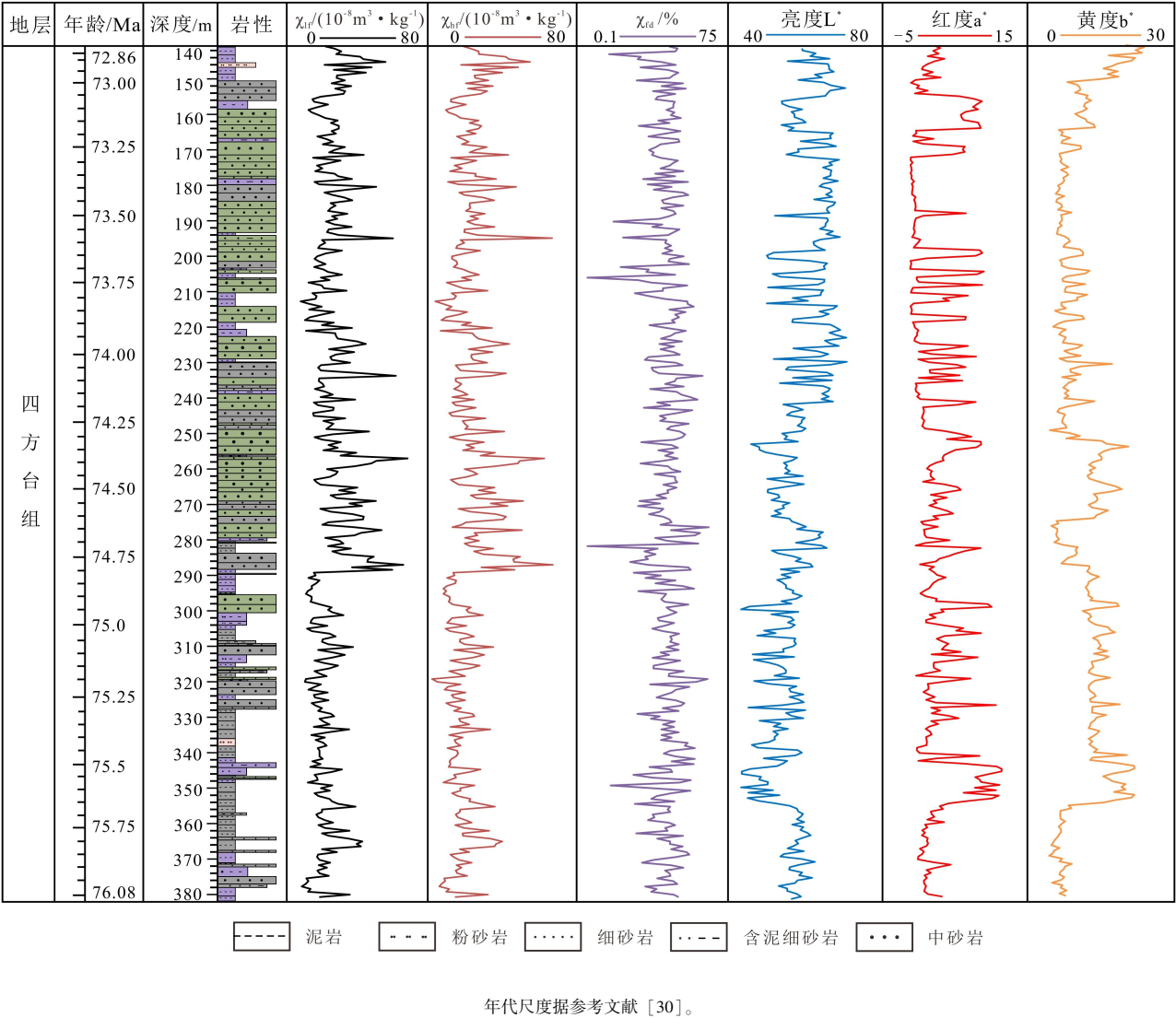


图2 ZKQA1-1 四方台组数据测试结果垂向展布特征图
Fig.2 Vertical distribution of test results for Sifangtai Formation in Well ZKQA1-1

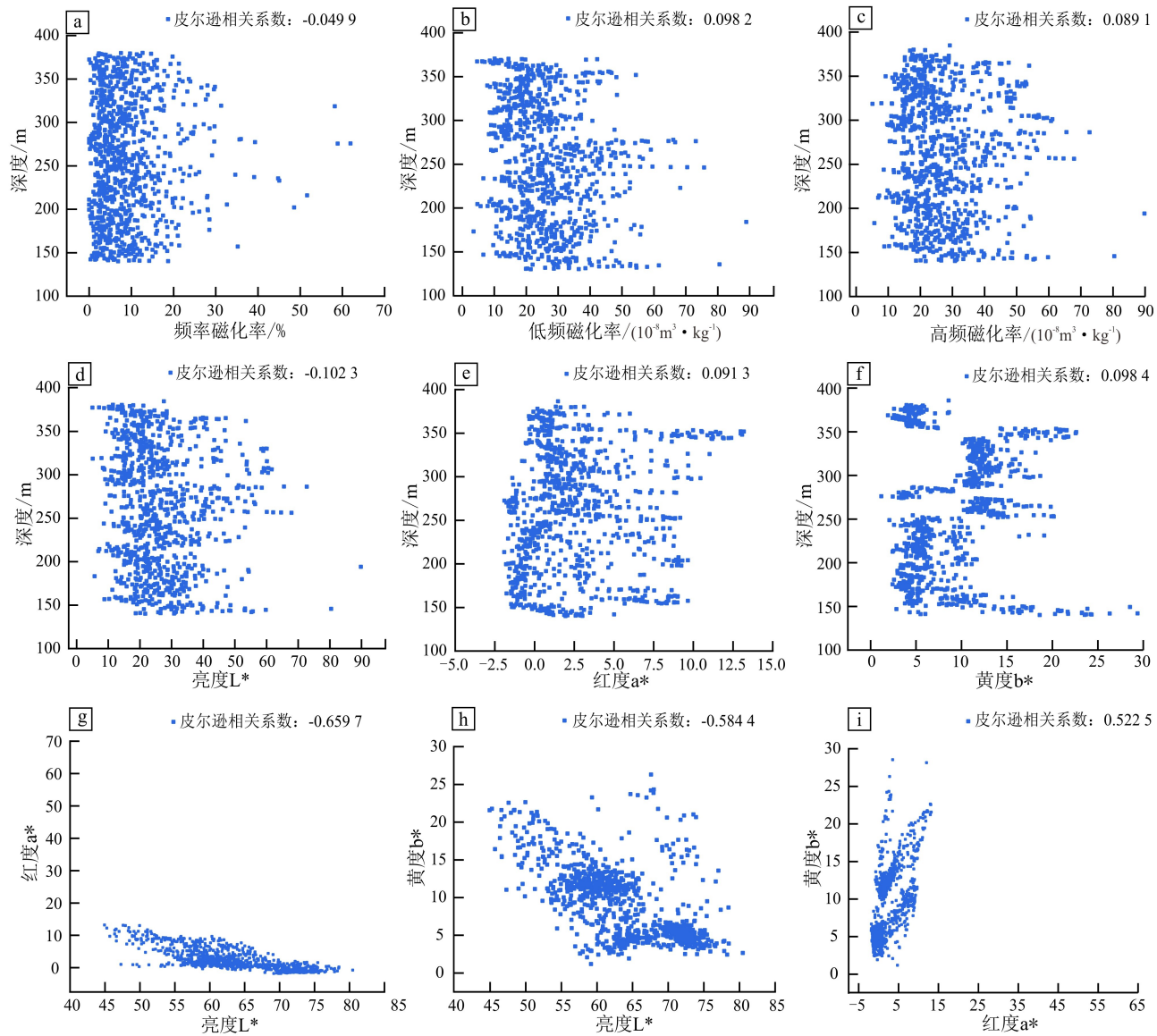
红度与氧化环境相对应，黄度受有机质等的影响显著，文色度三参数皮尔逊相关系数结果显示，红度 a^* 和黄度 b^* 相关系数为 0.522 5，亮度 L^* 和红度 a^* 相关系数为 -0.659 7，亮度 L^* 和黄度 b^* 相关系数为 -0.584 4，3 种相关系数绝对值均大于 0.5，指示红度 a^* 与黄度 b^* 呈正相关，亮度 L^* 与黄度 b^* 和红度 a^* 呈负相关（图 3b ~ d），反映了沉积物色度数据对古环境指示意义的可靠性^[35]。

4.2 聚类分析

为了直观反映各参数的变化特征，分析其古气候指示意义，并与全球古气候过程对比，本文采用

SPSS24 对低频磁化率 χ_{lf} 、高频磁化率 χ_{hf} 、频率磁化率 χ_{fd} 、亮度 L^* 值、红度 a^* 值和黄度 b^* 值分别进行聚类分析。将各指标数值进行一次滤波处理后，根据聚类分析结果将各指标分别划分出不同大类，取各大类平均值，用平均值代表这一大类参数的相应特征值。

聚类分析结果显示，高、低频磁化率、频率磁化率，亮度 L^* 值、红度 a^* 值和黄度 b^* 值均可以分为 4 个大类，低频磁化率 4 个大类的特征值分别为 $72.14 \times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$ ， $65.92 \times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$ ， $42.20 \times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$ 和 $32.25 \times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$ ；高频



a. 深度-频率磁化率相关性分析; b. 深度-低频磁化率相关性分析; c. 深度-高频磁化率相关性分析; d. 深度-亮度 L^* 相关性分析; e. 深度-红度 a^* 相关性分析; f. 深度-黄度 b^* 相关性分析; g. 红度 a^* -黄度 b^* 相关性分析; h. 亮度 L^* -红度 a^* 相关性分析; i. 亮度 L^* -黄度 b^* 相关性分析。

图3 色度-磁化率皮尔逊相关性分析图

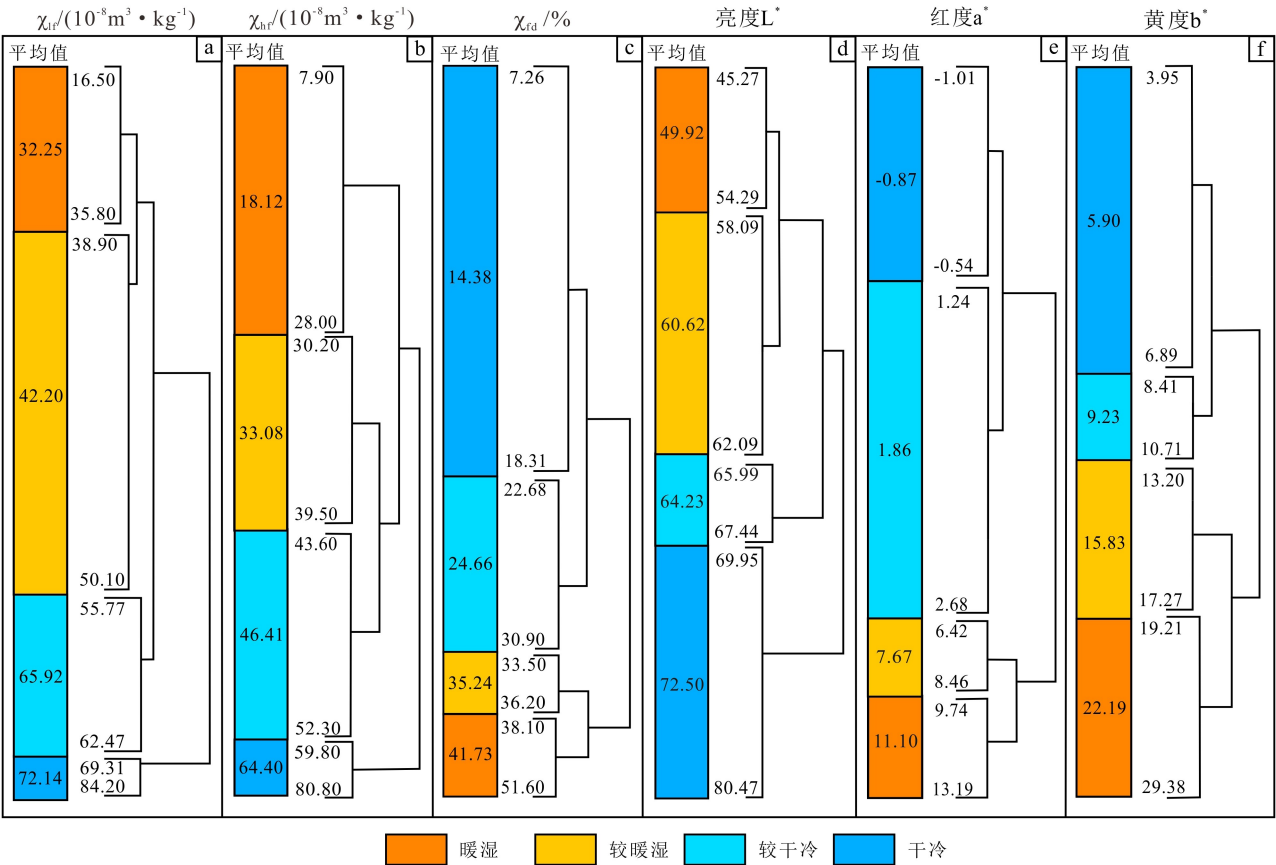
Fig. 3 Pearson correlation analysis of chromaticity and magnetic susceptibility

磁化率 4 个大类的特征值分别为 $64.40 \times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$, $46.41 \times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$, $33.08 \times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$ 和 $18.12 \times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$; 频率磁化率 4 个大类的特征值分别为 14.38%, 24.60%, 35.24% 和 41.73%; 亮度 L^* 4 个大类特征值分别为 49.92, 60.62, 64.23, 72.50; 红度 a^* 值的 4 个特征值为 -0.87, 1.86, 7.67 和 11.10; 黄度 b^* 值的 4 个特征值分别为 5.90, 9.23, 15.83 和 22.19。根据 6 组指标参数

的离散程度和曲线变化趋势, 选用方差变点检测统计分析方法中的滑动窗口法, 结合磁化率和色度各参数的指示意义, 按照聚类分析结果将气候类型分别对应为冷干, 较冷干, 较暖湿和暖湿 (图 4)。

5 讨论

ZKQA1-1 的钻孔资料显示本钻孔的四方台组为连续沉积, 其顶部灰绿色砂岩夹紫红色泥岩和砂



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. 亮度 L^* 值聚类结果; e. 红度 a^* 值聚类结果; f. 黄度 b^* 值聚类结果。

图4 ZKQA1-1 磁化率及色度数据聚类分析图
Fig. 4 Magnetic susceptibility and chroma data clustering analysis of Well ZKQA1-1

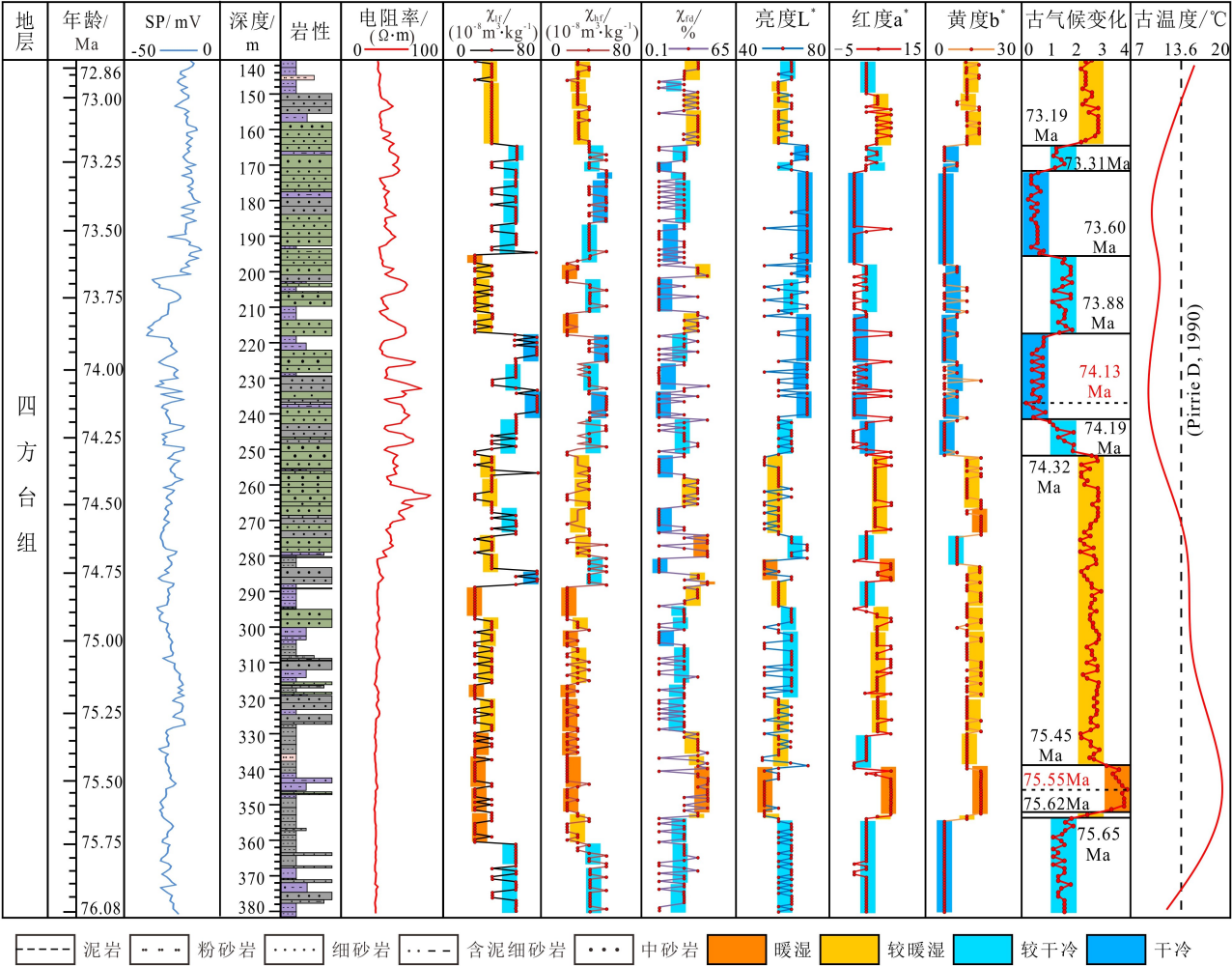
质砾岩与前人在松辽盆地四方台组研究发现一致^[19,36]，均为灰绿色砂岩夹紫红色泥岩和砂质砾岩，因此可以作为四方台组和明水组的界限。利用时序分析法结合磁化率数据计算四方台组沉积时间为76.08 ~ 72.86 Ma，与前人得到的结果吻合良好^[30]，因此，可以在此时间尺度上进行古气候研究。

前文相关分析显示了ZKQA1-1四方台组沉积物磁化率和色度不受成岩作用的影响，两种参数的波动主要源于其沉积背景，即当时的气候条件。聚类处理后所得磁化率和色度特征值的变化趋势显示出较原始数据更显著的特征，为古气候过程分析提供了独特的视角（图5）。

5.1 磁化率指标的古气候意义

沉积物磁化率主要由磁性矿物成分、含量以及粒径决定，往往与沉积环境有关。湖泊沉积物磁性

主要与外源磁性矿物供给有关，受磁性矿物颗粒粗细影响，细磁性颗粒直接影响频率磁化率的大小^[38]。在温暖湿润条件下，陆源供给充足，湖相沉积物粒度偏细，低频磁化率值呈低值，频率磁化率呈高值；相反在冷干气候下低频磁化率值为高值，频率磁化率为低值^[11]。本文四方台组沉积物高、低频磁化率及频率磁化率的变化表现为：76.08 ~ 75.75 Ma 低频磁化率（42.20 ~ 65.92） $\times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$ ，平均 $65.92 \times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$ ，高频磁化率介于（46.41 ~ 64.40） $\times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$ ，平均 $46.41 \times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$ ，两者均属相对高值，频率磁化率介于 14.38% ~ 24.66%，平均 24.66%，属相对低值，三者共同指示较冷干气候。75.75 ~ 74.32 Ma 低频磁化率介于（32.25 ~ 65.92） $\times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$ ，多数为（32.25 ~ 42.20） $\times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$ ，高频磁化率介于（18.12 ~ 46.41） $\times 10^{-8} \text{ m}^{-3}/\text{kg}$ ，多数为



古温度数据引自参考文献 [37]。

图5 古气候演化分析图

Fig. 5 Paleoclimate evolution analysis

($18.12 \sim 33.08$) $\times 10^{-8} m^3/kg$, 指示气候相对变暖湿-较暖湿, 低频磁化率在 74.80 ~ 74.75 Ma 和 74.60 ~ 74.50 Ma 出现相对高值 $65.92 \times 10^{-8} m^3/kg$ 和 $72.14 \times 10^{-8} m^3/kg$, 指示温度降低, 分别为较冷干和冷干气候, 高频磁化率在 74.80 ~ 74.70 Ma 相对高值 $46.41 \times 10^{-8} m^3/kg$, 是较冷干的验证, 也反映了该时期气候波动显著。该时期频率磁化率离散程度较高, 在 14.38% ~ 41.73% 震荡, 也是古气候波动的表现。74.32 ~ 73.19 Ma 低频磁化率大多介于 ($65.92 \sim 72.14$) $\times 10^{-8} m^3/kg$, 高频磁化率大多介于 ($46.41 \sim 64.4$) $\times 10^{-8} m^3/kg$, 两者处于相对高值, 频率磁化率大多介于 14.38% ~ 24.66%, 处于相对低值, 共同

指示相对较冷的气候。其中低频磁化率在 73.87 ~ 73.62 Ma 数据处于较低值 ($32.25 \sim 42.20$) $\times 10^{-8} m^3/kg$, 指示较暖湿气候, 高频磁化率在 73.87 ~ 73.80 Ma 和 73.68 ~ 73.60 Ma 出现较低值 $18.12 \times 10^{-8} m^3/kg$, 指示暖湿气候, 频率磁化率在 73.87 ~ 73.80 Ma 和 73.68 ~ 73.60 Ma 出现较高值 35.24%, 指示较暖湿气候, 此阶段温度依然呈波动特征。

74.32 ~ 72.86 Ma 低频磁化率大多为 $42.2 \times 10^{-8} m^3/kg$, 高频磁化率介于 ($18.12 \sim 33.08$) $\times 10^{-8} m^3/kg$, 两者数值均处于相对低值, 频率磁化率大多为 35.24%, 处于相对高值, 共同指示较暖湿气候。

5.2 色度指标的古气候意义

沉积物色度是矿物组成的反映,物理化学风化和沉积过程影响沉积物的物质组成,从而表现出色度的变化。亮度 L^* 值随碳酸盐的增加而增加,高值代表较冷干的气候,且随总有机碳的增加而减小,低值代表较暖湿气候^[39]。红度 a^* 主要受赤铁矿影响,而针铁矿会引起黄度 b^* 的变化,通常红度 a 和黄度 b 的高值反映暖湿的气候,低值反映冷干气候^[40]。本文剖面沉积物红度 a^* 值和黄度 b^* 值与亮度 L^* 值的负相关关系进一步验证了色度指标对古气候的共同指示意义。

76.08 ~ 75.65 Ma 红度 a^* 值在 1.86 上下浮动,黄度 b^* 值主要在 9.23 上下浮动,相对较低;亮度 L^* 值主要在 72.50 上下浮动,为高值,三者反映较冷干气候。

75.65 ~ 74.32 Ma 红度 a^* 值波动范围 1.86 ~ 7.67,黄度 b^* 值主要介于 9.23 ~ 15.83,亮度 L^* 值介于 49.92 ~ 72.50,且波动较为剧烈,反映了相对暖湿气候。其中红度 a^* 值在 75.45 ~ 75.32 Ma, 74.87 ~ 74.77 Ma 和 74.70 ~ 74.62 Ma 为 1.86,显示短暂的较冷干时期,黄度 b^* 值在 74.70 ~ 74.62 Ma 为 9.23,也反映了短期的较冷干变化。

74.32 ~ 73.19 Ma 红度 a^* 值在 -0.87 上下浮动,黄度 b^* 值主要为 5.90,相对较低;亮度 L^* 值在 72.50 上下浮动,为相对高值,反映了较干燥且冷的气候背景。

73.19 ~ 72.86 Ma 红度 a^* 值介于 1.86 ~ 7.67,黄度 b^* 值介于 15.83 ~ 22.19,两者相对较低,亮度 L^* 值介于 60.62 ~ 64.23,相对较高,反映气候较暖湿的转变。

5.3 四方台组古气候演化规律及全球气候对比

高频、低频、和频率磁化率以及亮度 L^* 值、红度 a^* 值和黄度 b^* 值的单位是不同的,这种不同限制了磁化率和色度指标在古气候分析中的应用。本文在聚类分析的基础上对划分出的 4 个气候类型进行两步赋值处理。首先在深度域上赋予各样品所属大类的均值,绘制各参数所属大类均值随深度的变化曲线(图 5);然后将冷干气候赋值为 0.5,较冷干气候赋值为 1.5,较暖湿气候赋值为 2.5,暖湿气候赋值为 3.5,结合所属各参数所属大类均值进行降噪处理,取 6 个参数赋值降噪后的平均值,获得 6 个参数综合降噪后在时间尺度上的变化

曲线,即四方台组古气候变化曲线(图 5)。根据赋值计算所得结果,可将研究区四方台组古气候过程分为 10 个阶段(76.08 ~ 75.65 Ma, 75.65 ~ 74.62 Ma, 74.62 ~ 75.45 Ma, 75.45 ~ 74.32 Ma, 74.32 ~ 74.19 Ma, 74.19 ~ 73.88 Ma, 73.88 ~ 73.60 Ma, 73.60 ~ 73.31 Ma, 73.31 ~ 73.19 Ma, 73.19 ~ 72.86 Ma),呈较冷干-较暖湿-暖湿-较暖湿-较冷干-冷干-较冷干-冷干-较冷干-较暖湿的变化趋势(图 5)。

结合全球晚白垩系平均温度对比^[37],可知:

76.08 ~ 75.65 Ma 时期,气候较冷干,后期呈较快地转暖湿趋势。该阶段处于 Campanian 中期,此时全球大气二氧化碳浓度较高,表层及底层海水温度、全球海平面相对抬升。此时四方台组水位抬升,暖湿气候持续加强,受赤道辐合带(ITCZ)迁移影响^[41-42],导致在 75.55 Ma 出现古温度的极高值,随后古温度逐渐降低。

75.65 ~ 74.32 Ma 时期,早期 75.65 ~ 75.62 Ma 约 3 万 a 期间,古温度明显很高,表现为暖湿;后下降至相对稳定状态后,持续保持在较暖湿状态至 74.32 Ma,且气候系统相对稳定。该阶段处于 Campanian 中晚期,此阶段发生的 CMBE 气候事件导致大气二氧化碳浓度降低且全球变冷,这与本文四方台组 75.55 ~ 74.32 Ma 时期古温度略下降相对应。此时由于全球温度下降导致北半球西风环流向南扩张且强度增加^[43],改变了松辽盆地内部的水汽来源,气候相对干燥,古湖平面保持低位,四方台组水位下降,进而导致在 74.13 Ma 的极冷干现象。

74.32 ~ 73.19 Ma 时期,古气候先冷干再转暖变湿润。其中,74.32 ~ 74.19 Ma, 73.88 ~ 73.60 Ma 和 73.31 ~ 73.19 Ma 为较冷干的古气候,74.19 ~ 73.88 Ma 和 73.60 ~ 73.31 Ma 为冷干气候。总的来看本阶段古气候表现出以冷干为主,较冷干-冷干-较冷干-冷干-较冷干的波动特点。

73.19 ~ 72.86 Ma 时期,古气候已变为较暖湿润的特点,但后期温度略有下降趋势。从全球角度来讲,74.32 ~ 72.86 Ma 处于 Campanian 晚期,气候相对温暖湿润,此阶段大气二氧化碳浓度升高进而使全球温度升高^[44],研究区四方台组 74.13 ~ 72.86 Ma 古气候表现出波动式变暖的过程。此时全球升温可能与德干玄武岩喷发事件前夕间歇性火

山活动所导致的大气二氧化碳上升有关^[31,45], 古湖平面略有抬升, 四方台组此时水位也为上升过程, 可能是温度升高和水汽增加共同导致。

总体来看, 本文四方台组沉积物磁化率和色度的波动性显著, 气候变化规律较为清晰。古温度具波动特征, 其出现的两次极值时期与晚白垩世全球平均温度变化曲线对应较好, 根据古气候替代指标分析结果显示四方台组的气候相对温暖干燥。

6 结论

(1) 松辽盆地乾安地区四方台组沉积物色度和磁化率数据受后期成岩作用影响很小, 可以作为分析该时段古气候变迁的有效指标。

(2) 松辽盆地乾安地区四方台组古气候类型可分为4类: 冷干, 较冷干, 较暖湿, 暖湿, 总体呈冷-暖-冷-暖的变化趋势, 属于相对温暖干旱的气候特征, 4个气候阶段分别为 76.08 ~ 75.65 Ma、75.65 ~ 74.32 Ma、74.32 ~ 73.19 Ma 和 73.19 ~ 72.86 Ma。

(3) 松辽盆地乾安地区四方台组古气候与晚白垩全球气候相呼应, 其中 75.55 Ma 出现古温度的极高值, 与赤道辐合带 (ITCZ) 迁移有关。74.13 Ma 现古温度的极低值, 可能与 CMBE 气候事件全球 CO₂ 含量迅速减少有关。

(4) 研究区 74.13 ~ 72.86 Ma 气候湿润, 温度升高, 可能与 Campanian 晚期的德干玄武岩喷发事件前夕间歇性火山活动有关。

参考文献:

[1] 戎嘉余, 黄冰. 生物大灭绝研究三十年 [J]. 中国科学 (地球科学), 2014, 44 (3): 377-404.
RONG J Y, HUANG B. Study of Mass Extinction over the past thirty years: a synopsis [J]. Scientia Sinica Terra, 2014, 44 (3): 377-404.

[2] 万晓樵, 吴怀春, 席党鹏, 等. 中国东北地区白垩纪温室时期陆相生物群与气候环境演化 [J]. 地学前缘, 2017, 24 (1): 18-31.
WAN X Q, WU H C, XI D P, et al. Terrestrial biota and climate during Cretaceous greenhouse in NE China [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24 (1): 18-31.

[3] 张立平, 王东坡. 松辽盆地白垩纪古气候特征及其变化机制 [J]. 岩相古地理, 1994, 14 (1): 11-16.
ZHANG L P, WANG D P. Paleoclimatic characteristics

and the mechanism for climatic changes in the Songliao Basin during the Cretaceous [J]. Sedimentary Facies and Paleogeography, 1994, 14 (1): 11-16.

[4] 高瑞祺, 赵传本, 郑玉龙, 等. 松辽盆地深层早白垩世孢粉组合研究 [J]. 古生物学报, 1994, 33 (6): 659-675, 785-787.
GAO R Q, ZHAO C B, ZHENG Y L, et al. Palynological study of deepbeds (Lower Cretaceous) in Songliao Basin, China [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1994, 33 (6): 659-675, 785-787.

[5] 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, ZHENG Y L, YANG M J, et al. On Cretaceous paleoclimate in the Songliao Basin [J]. Acta Micropaleontologica Sinica, 1999, 16 (1): 99-107.

[6] 林铁锋, 付秀丽, 艾鑫, 等. 松辽盆地古龙凹陷青山口组页岩层系岩相类型及旋回模式 [J]. 世界地质, 2024, 43 (3): 378-389.
LIN T F, FU X L, AI X, et al. Lithofacies types and cycle patterns of shale layers of Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin [J]. World Geology, 2024, 43 (3): 378-389.

[7] 张德军, 郑月娟, 张淑芹, 等. 松科2井早白垩世沙河子组孢粉组合及其古气候意义 [J]. 地质通报, 2024, 43 (增刊1): 429-442.
ZHANG D J, ZHENG Y J, ZHANG S Q, et al. Early Cretaceous spore-pollen assemblages from the Shahezi Formation in Well SK-2 and their paleoclimate significance [J]. Geological Bulletin of China, 2024, 43 (Suppl. 1): 429-442.

[8] 杨柳, 高远, 毋正轩, 等. 白垩纪中期热室地球陆地古气候研究进展 [J]. 第四纪研究, 2024, 44 (5): 1188-1204.
YANG L, GAO Y, WU Z X, et al. Advances in research on terrestrial paleoclimate in the mid-Cretaceous hothouse earth [J]. Quaternary Sciences, 2024, 44 (5): 1188-1204.

[9] GAO Y, GAO Y F, DANIEL E I, et al. Clay mineralogical evidence for mid-latitude terrestrial climate change from the latest Cretaceous through the earliest Paleogene in the Songliao Basin, NE China [J]. Cretaceous Research, 2021, 124: 104827.

[10] WANG Z, SUN P C, DU J F, et al. Eocene paleoclimate evolution under the background of warm house: hothouse conditions in the continental Fushun Basin: implications from magnetic susceptibility and color reflectance [J]. ACS Omega, 2022, 7 (28): 24614-24625.

- [11] PECK J A, KING J W, COLMAN S M, et al. A rock magnetic record from Lake Barkal Siberia: evidence of Late Quaternary climate change [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 122 (1/2): 221–238.
- [12] 方大钧, 叶德泉. 中国松辽盆地白垩纪岩石磁化率、剩磁强度与古气候意义 [J]. *地球物理学报*, 1989, 32 (1): 111–114.
- FANG D J, YE D Q. Magnetic susceptibility and remanence intensity of Cretaceous rocks from Songliao Plain of China, their significance in paleoclimate [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1989, 32 (1): 111–114.
- [13] FERNANDEZ R N, SCHULZE D G, GOFFIN D L, et al. Color, organic matter, and pesticide adsorption relationships in a soil landscape [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 52 (4): 1023–1026.
- [14] 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. Research of paleoenvironment process during the Eocene in Yilan area of Yi – Shu graben [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [15] 张新荣, 平帅飞, 焦洁钰, 等. 松嫩平原南缘现代沉积物磁化率、粒度、色度特征及古气候环境意义 [J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 2020, 50 (2): 465–479.
- ZHANG X R, PING S F, JIAO J Y, et al. Characteristics of magnetic susceptibility, grain size and chromaticity of modern sediments in the southern margin of Songnen Plain and their paleoclimate environment significance [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50 (2): 465–479.
- [16] 陈路路, 李名, 汤超, 等. 松辽盆地北部三肇凹陷四方台组含铀砂岩岩石学、矿物学特征及其地质意义 [J]. *华北地质*, 2022, 45 (4): 10–20.
- CHEN L L, LI M, TANG C, et al. Petrology and mineralogy characteristics of the Uranium-bearing sandstone from Sifantai Formation in Sanzhao Depression of northern Songliao Basin and their geological implications [J]. *North China Geology*, 2022, 45 (4): 10–20.
- [17] 汤超, 魏佳林, 陈路路, 等. 松辽盆地长垣南端四方台组碎屑岩地球化学特征及其对物源与构造背景的制约 [J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45 (5): 892–912.
- TANG C, WEI J L, CHEN L L, et al. Geochemical characteristics of clastic rocks and their constrains on source and tectonic background of the Sifantai Formation at the southern end of the Changyuan, Songliao Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45 (5): 892–912.
- [18] 侯晓光, 罗敏, 王志华, 等. 松辽盆地北部依安地区四方台组沉积特征与铀成矿条件分析 [J]. *铀矿地质*, 2022, 38 (4): 618–630.
- HOU X G, LUO M, WANG Z H, et al. Sedimentary characteristics and uranium metallogenic conditions of Sifantai Formation in Yi'an area, northern Songliao Basin [J]. *Uranium Geology*, 2022, 38 (4): 618–630.
- [19] 王君贤, 李子颖, 邢作昌, 等. 松辽盆地乾安地区上白垩统四方台组天文旋回识别及对铀矿化砂岩沉积时代的限定 [J]. *原子能科学技术*, 2024, 58 (增刊 1): 182–190.
- WANG J X, LI Z Y, XING Z C, et al. Identification of astronomical cycles in Upper Cretaceous Sifantai Formation and constraints on depositional age of uranium mineralized sandstones in Qian'an area of Songliao Basin [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2024, 58 (Suppl. 1): 182–190.
- [20] 白雪峰, 陆加敏, 李军辉, 等. 松辽盆地北部全油气系统成藏模式与勘探潜力 [J]. *大庆石油地质与开发*, 2024, 43 (3): 49–61.
- BAI X F, LU J M, LI J H, et al. Hydrocarbon accumulation patterns and exploration potential of whole petroleum systems in northern Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2024, 43 (3): 49–61.
- [21] 高航, 王璞珺, 高有峰, 等. 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*, 2023, 30 (3): 425–440.
- GAO H, WANG P J, GAO Y F, et al. The Upper–Lower Cretaceous boundary in the southern Songliao Basin: a case study of ICDP borehole SK-3 [J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30 (3): 425–440.
- [22] 王东旭, 罗敏, 聂逢君, 等. 松辽盆地西缘泰康地区四方台组铀成矿特征 [J]. *科学技术与工程*, 2021, 21 (14): 5677–5687.
- WANG D X, LUO M, NIE F J, et al. Uranium metallogenic characteristics of Sifantai Formation in Taikang area, western margin of Songliao Basin [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21 (14): 5677–5687.
- [23] 邢作昌, 贾立城, 王秀杰, 等. 松辽盆地乾安地区四方台组砂岩型铀成矿条件与找矿方向 [J/OL]. *中国地质*, 2023, 1–23, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20230613.1521.002.html>.
- XING Z C, JIA L C, WANG X J, et al. Metallogenic

- conditions and prospecting direction of sandstone-type uranium deposit of Sifangtai Formation in Qian'an area, Songliao Basin [J/OL]. *Geology in China*, 2023, 1–23. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20230613.1521.002.html>.
- [24] 李研, 聂逢君, 严兆彬, 等. 松辽盆地北部依安地区四方台组砂岩地球化学特征及岩石成因意义 [J]. *科学技术与工程*, 2022, 22 (5): 1814–1820.
LI Y, NIE F J, YAN Z B, et al. Geochemical characteristics and petrogenetic significance of the sandstones of the Sifangtai Formation in Yi'an area, northern Songliao Basin [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22 (5): 1814–1820.
- [25] 蔡宁宁, 邹姐姐, 付勇, 等. 松辽盆地大庆长垣南缘四方台组砂岩型铀矿碳氧同位素特征及铀成矿意义 [J]. *地质科技通报*, 2021, 40 (3): 140–150.
CAI N N, ZOU N N, FU Y, et al. Carbon and oxygen isotopic characteristics and uranium mineralization significance of the sandstone-type uranium deposit in the Sifangtai Formation at the southern margin of Daqing placanticline in Songliao Basin [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40 (3): 140–150.
- [26] 刘阳, 王军礼, 李建国, 等. 松辽盆地北部大庆长垣上白垩统四方台组精细地层划分及其铀成矿意义 [J]. *地层学杂志*, 2020, 44 (2): 181–190.
LIU Y, WANG J L, LI J G, et al. Fine stratigraphic division of the Upper Cretaceous Sifangtai Formation in the Daqing placanticline, northern Songliao Basin and its significance for uranium mineralization [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2020, 44 (2): 181–190.
- [27] 王成善, 高远, 王璞珺, 等. 松辽盆地国际大陆科学钻探: 白垩纪恐龙时代陆相地质记录 [J]. *地学前缘*, 2024, 31 (1): 412–430, 511–534.
WANG C S, GAO Y, WANG P J, et al. International continental scientific drilling project of the Songliao Basin: terrestrial geological records of the Cretaceous dinosaur age [J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31 (1): 412–430, 511–534.
- [28] 叶蕴琪. 松辽盆地西南部晚白垩世嫩江组至四方台组非海相介形类的分类和生物地层对比 [D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
YE Y Q. Taxonomy and biostratigraphy of limnic ostracoda (crustacea) from the Nenjiang and Sifangtai Formations, Santonian – Campanian, Upper Cretaceous, Songliao Basin, NE China [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- [29] 黄清华, 吴怀春, 万晓樵, 等. 松辽盆地白垩系综合年代地层学研究新进展 [J]. *地层学杂志*, 2011, 35 (3): 250–257.
HUANG Q H, WU H C, WAN X Q, et al. New progress of integrated chronostratigraphy of the Cretaceous in Songliao Basin [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2011, 35 (3): 250–257.
- [30] 吴怀春, 李山, 王成善, 等. 松辽盆地白垩纪综合年代地层格架 [J]. *地学前缘*, 2024, 31 (1): 431–445.
WU H C, LI S, WANG C S, et al. Integrated chronostratigraphic framework for Cretaceous strata in the Songliao Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31 (1): 431–445.
- [31] IOVINE R S, PELULLO C, ARIENZO I, et al. Insights into magma reactivation times prior to a catastrophic highly explosive event: the Campanian Ignimbrite eruption (Campi Flegrei, Italy) [J]. *Bulletin of Volcanology*, 2025, 87 (27): 1–17.
- [32] 刘招君, 王东坡, 刘立, 等. 松辽盆地白垩纪沉积特征 [J]. *地质学报*, 1992, 66 (4): 327–338.
LIU Z J, WANG D P, LIU L, et al. Sedimentary characteristics of the Cretaceous Songliao Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1992, 66 (4): 327–338.
- [33] 徐增连, 汤超, 魏佳林, 等. 大庆长垣南端晚白垩世孢粉组合特征及其古气候记录 [J]. *华北地质*, 2021, 44 (2): 74–80.
XU Z L, TANG C, WEI J L, et al. Late Cretaceous palynological record and its paleoclimate significance in the southern of Daqing placanticline [J]. *North China Geology*, 2021, 44 (2): 74–80.
- [34] 胡梦珺, 吉天琪, 郑登友, 等. 9.4 ka 以来青藏高原东北部风成沉积物色度参数变化特征及其环境演变 [J]. *现代地质*, 2022, 36 (2): 439–448, 461.
HU M J, JI T Q, ZHENG D Y, et al. Variation characteristics of chromatic parameters of eolian sediments and environmental evolution on the northeastern Tibetan Plateau since 9.4 ka [J]. *Geoscience*, 2022, 36 (2): 439–448, 461.
- [35] BARRON V, TORRENT J. Use of the Kubelka–Munk theory to study the influence of iron oxides on soil colour [J]. *Journal of Soil Science*, 1986, 37 (4): 499–510.
- [36] 张航, 聂逢君, 蔡建芳, 等. 松辽盆地北部砂岩型铀矿成矿有利条件分析与找矿方向探讨 [J]. *世界核地质科学*, 2023, 40 (2): 174–185.
ZHANG H, NIE F J, CAI J F, et al. Analysis of favorable metallogenic conditions and exploration direction of

- sandstone-type uranium deposits in northern Songliao Basin in China [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2023, 40 (2): 174–185.
- [37] YANG D, FANG X, SONG Y, et al. Development of a pediment on western slopes of Liupan Mountain related to the Neotectonic Uplift [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46 (Suppl. 1): 11–15.
- [38] BALSAM W L, WOLHART R J. Sediment dispersal in the Argentine Basin: evidence from visible light spectra [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 1993, 40 (4): 1001–1031.
- [39] PIRRIE D, MARSHALL, J D. High-paleo attitude Late Cretaceous paleotemperatures: new data from James Ross Island. Antarctica [J]. *Geology*, 1990, 18 (1): 31–34.
- [40] THANPSON R, OLDFIELD F. Environmental magnetism [M]. London: Allen & Unwin, 1986: 1–227.
- [41] BEHERA S K. Tropical and extratropical air-sea interactions: modes of climate variations [M]. Amsterdam: Elsevier, 2020: 171–206.
- [42] TANG X J, YU Z J, LU Z Y, et al. Orbital hydroclimate variability revealed by grain-size evidence in the tropical Pacific Islands since 140 ka [J]. *Global and Planetary Change*, 2024, 236 (12): 104429.
- [43] MILLER K G, WRIGHT J D, BROWNING J V. Visions of ice sheets in a greenhouse world [J]. *Marine Geology*, 2005, 217 (34): 215–231.
- [44] GAO Y, IBARRA D E, WANG C S, et al. Mid-latitude terrestrial climate of east Asia linked to global climate in the late Cretaceous [J]. *Geology*, 2015, 43 (4): 287–290.
- [45] LI L Q, KELLER G. Abrupt deep-sea warming at the end of the Cretaceous [J]. *Geology*, 1998, 26 (11): 995–998.