

引用格式:赵薇,孟杰,谢远云,等. 2026. 松嫩平原罗家窝棚组黏土矿物特征及其气候意义[J]. 沉积学报, 44(4): 1369-1383.

ZHAO Wei, MENG Jie, XIE YuanYun, et al. 2026. Characteristics of Clay Minerals and Their Climatic Significance in Luojiawopeng Formation, Songnen Plain[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(4): 1369-1383.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.001

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.001

松嫩平原罗家窝棚组黏土矿物特征及其气候意义

赵薇¹, 孟杰¹, 谢远云¹, 李本仙², 迟云平¹, 孙磊¹, 魏振宇¹, 刘海金¹, 汪烨辉¹, 吴鹏³

1. 哈尔滨师范大学地理科学学院, 哈尔滨 150025

2. 吉林大学地球科学学院, 长春 130012

3. 湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湖南湘潭 411201

摘要 【目的】罗家窝棚组是松嫩平原东南缘下更新统的一套紫红色砂砾石堆积地层, 针对该地层开展黏土矿物分析有利于深入理解该区域古气候特征, 明确其地层时代。【方法】对罗家窝棚组开展全岩地球化学、黏土矿物X射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)和高分辨率透射电子显微镜(HRTEM)等分析, 揭示该地层黏土矿物组成及转化特征, 并与黄土高原红黏土层的黏土矿物组成进行对比。【结果】罗家窝棚组黏土矿物组成以高岭石为主(含量57%~73%), 伊利石(含量25%~41%)次之, 黑云母/蛭石混层矿物含量最少(平均含量为1%)。高岭石呈假六方片状, 自形程度和结晶度高指示其自生成因, 较高的伊利石结晶度(平均值为0.55)及化学指数(平均值为0.50)、黏土/石英比值较高均指示强烈的风化程度。黏土矿物转化过程为伊利石→高岭石, 黑云母→黑云母/蛭石混层矿物→高岭石, 与常量元素 $4\text{Si-M}^+-\text{R}^{2+}$ 三元图解具有高岭石化趋势一致, 结合该组地层较高的化学蚀变指数(CIA)和赤铁矿/针铁矿值, 共同指示该地层处于强风化的湿热气候环境。【结论】推测罗家窝棚组形成于湿热的气候背景, 并非前人认为的冰碛物堆积, 该地层的地质年代可能为早更新世之前东亚夏季风盛行的湿热时期。

关键词 黏土矿物; 气候意义; 罗家窝棚组; 松嫩平原

第一作者 赵薇, 女, 1999年出生, 硕士研究生, 第四纪地质与环境变化, E-mail: 18734381220@163.com

通信作者 孟杰, 女, 讲师, E-mail: mengjie26@126.com

中图分类号: P532 文献标志码: A 文章编号: 1000-0550(2026)04-1369-15

0 引言

沉积地层记录了丰富的地表过程信息, 在构造背景、沉积环境、古地理演化等方面发挥了重要作用。通过探讨地层综合属性特征如岩性、结构构造、矿物组成及地球化学等(祁帅帅等, 2020; 李一凡等, 2024; 韦恒叶等, 2024), 能为深入理解沉积地层的古地理环境提供重要线索。松嫩平原位于东亚夏季风的边缘地区, 对气候变化较为敏感。罗家窝棚组是哈尔滨地区一套独特的紫红色砾石堆积地层, 其沉积环境蕴含着丰富的气候信息。但其在地质归属和气候背景等方面仍存在争议, 缺乏精细的矿物学分析, 限制了对该地层指示古环境特征的理解。

以往认为罗家窝棚组是哈尔滨地区第四纪最底层的地层单元, 直接覆盖于白垩系泥岩风化壳之上

(吴金城等, 1984), 长期以来被认为是寒冷干燥气候下的一套冰碛物堆积地层(赵启刚等, 1993)。但最近研究认为该地层以紫红色砂砾层堆积为主, 经历了强烈的化学风化, 为干热气候条件下近距离搬运的洪积物堆积(魏春艳等, 2022)。目前该地层的研究主要集中于沉积环境(魏春艳等, 2022)、地层特征(孙磊, 2023)以及与其他砾石层剖面地质特征的对比(冷宇坤等, 2023; 高宏宇等, 2023; 曾吉莉等, 2026)。例如, 孙磊(2023)通过对罗家窝棚组年代框架和物源的讨论, 认为物源来自较近的源区(如张广才岭), 推测沉积年龄介于2.3~2.6 Ma, 甚至更老一些。曾吉莉等(2026)明确了三截地剖面与罗家窝棚组之间在源岩性质、沉积学、构造背景等方面的异同, 二者均为长英质母岩和初次循环产物。但关于该地层的古气候研究较少, 尤其是利用黏土矿物指

收稿日期: 2024-11-18; 修回日期: 2025-01-02; 录用日期: 2025-02-17; 网络出版日期: 2025-02-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(42171006); 黑龙江省自然科学基金项目(ZD2023D003)

组以星点断续带状分布在山前平原及与丘陵接触带,与上覆关家窝棚组界限明显,关家窝棚组为灰黑、黑灰色淤泥质亚黏土(孙磊,2023)。

罗家窝棚组位于五常市拉林镇以东($45^{\circ}14'59''$ N, $126^{\circ}56'33''$ E),典型剖面由1965年黑龙江省水文地质队进行水文地质勘察时首先确定,并划定为第四系下更新统。1974年在黑龙江省地层工作会议确定其为罗家窝棚组(吴金城等,1984),该地层在地貌上呈垅状、鼓丘状,断续出露在山前平原与滨东丘陵的接触带上。露头厚约20 m,上覆河漫滩相黄褐色沉积物,下伏暗红色砾石沉积物,其中紫红色砾石堆积属于罗家窝棚组。研究区属于中温带湿润半湿润季风性气候,全年盛行西南风,年均温在 4.2°C 左右,降水量介于550~700 mm(刘硕等,2021)。

2 样品采集与研究方法

本文以罗家窝棚组为研究对象,在前期采样工作基础上,选择近距离的邻近部位进行细砂质、泥质透镜体、泥质填隙物的采集(图2),共获取了8个样品,其中3个细砂质透镜体样品(FS1、FS2、FS3)(图2b),3个泥质透镜体样品(N1、N2、N3)(图2c),2个泥质填隙物样品(LJWP5、LJWP9)(图2d),这些相对细

粒的组分,有效记录了该地层的化学风化特征。分别对8个样品开展了地球化学分析、原岩及黏土矿物XRD测试、对细砂质透镜体进行了偏光显微镜镜下岩相鉴定,选择代表性的样品开展了扫描电子显微镜(SEM)和高分辨率透射电子显微镜(HRTEM)分析。

2.1 地球化学分析

样品在室内经过自然风干后,用玛瑙研钵研磨至200目以上均匀粉末状。常量元素用日本ZSX Primus II sequential spectrometer X射线荧光光谱法测得,采用熔样法,检测限为0.01%,分析精度低于1%,上述常量元素分析在吉林大学地球科学学院完成。

2.2 黏土矿物分析

LJWP5和LJWP9为砾石间泥质填隙物,样品量较少,黏土矿物分析直接采用研磨后样品进行。将其余6个样品利用Stocks原理提取样品中的黏土粒级组分($<2\text{ }\mu\text{m}$)。将提取后的黏土矿物样品风干后研磨,各称量40 mg,加入0.7 mL蒸馏水超声振荡,之后迅速将溶液滴于载玻片后置于空气中自然风干,制成自然干燥片(N)。测试后的自然干燥片置于适量乙二醇溶液的干燥皿中,于 60°C 的条件下至少饱和12 h,即制成乙二醇饱和片(EG)。自然干燥片和乙二醇饱和片的扫描范围为 $(2\theta)3^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 。高岭石

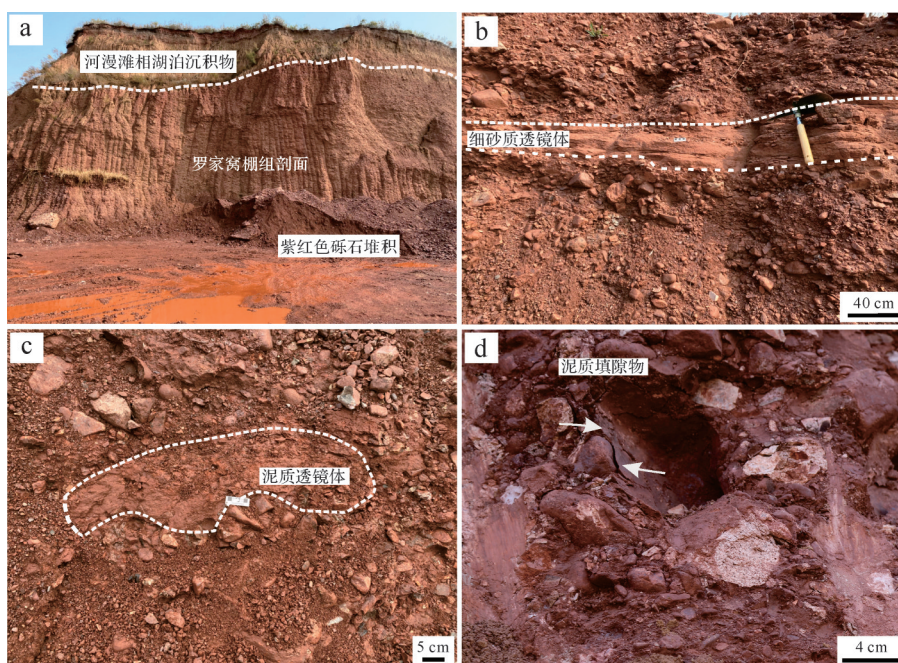


图2 罗家窝棚组剖面及采样图

(a)罗家窝棚组剖面;(b)细砂质透镜体;(c)泥质透镜体;(d)泥质填隙物

Fig.2 Stratigraphic section and sampling map of Luojiawopeng Formation

(a) Luojiawopeng Formation; (b) fine sandstone lenses; (c) mudstone lenses; (d) muddy interstitial materials

(001)(002)衍射峰和绿泥石(002)(003)的衍射峰近乎重合,为保证实验结果的准确性和可靠性,故制作盐酸片(HCl)来进一步确认高岭石的存在(赵杏媛, 1981;赵万苍, 2015;王春鹏等, 2023)。在小于2 μm 的黏土矿物中加入6 mol/L的盐酸并放置于80 $^{\circ}\text{C}$ 水浴锅中反应30 min,用去离子水清洗3遍,并用 AgNO_3 确认 Cl^- 清洗干净后制成盐酸片。经盐酸片(HCl)测试后,高岭石衍射特征峰不会消失,而绿泥石则会被溶解消失(赵杏媛, 1981)。为准确确定黏土矿物类型,分别制作镁饱和片(Mg)、镁—乙二醇饱和片(Mg-Eg)及不同温度下的K饱和片。其中,将黏土矿物颗粒置于1 mol/L的 MgCl_2 溶液中,在25 $^{\circ}\text{C}$ 下浸泡24 h,洗涤3次去除 Cl^- ,制得Mg饱和片。将测试完的Mg饱和片(Mg)放在装有乙二醇的干燥皿中,在60 $^{\circ}\text{C}$ 下饱和12 h制得镁—乙二醇饱和片(Mg-Eg)。K-25 $^{\circ}\text{C}$ 饱和片是将黏土矿物颗粒置于1 mol/L的KCl溶液中,在25 $^{\circ}\text{C}$ 下浸泡24 h制得。待上机完成后,将K-25 $^{\circ}\text{C}$ 饱和片放置马弗炉中分别在110 $^{\circ}\text{C}$ 、300 $^{\circ}\text{C}$ 和550 $^{\circ}\text{C}$ 下加热2.5 h,制成K-110 $^{\circ}\text{C}$ 、K-300 $^{\circ}\text{C}$ 和K-550 $^{\circ}\text{C}$ 饱和片。实验测试仪器为Rigaku Ultima IV型X射线衍射仪(Cu-K α 靶,电压40 kV,电流30 mA)。上述黏土矿物X射线衍射分析测试在哈尔滨师范大学材料物理与化学重点实验室完成。

黏土矿物的半定量计算在乙二醇处理衍射曲线上采用Jade 6软件分析获得。相对含量的计算依据Kahle *et al.* (2002)提出的100%归一化思想,计算MIF值获得(Huang *et al.*, 2020)。公式如下:

$$W_a = (I_a / \text{MIF}_a) / \sum_{i=1}^N (I_i / \text{MIF}_i) \quad (1)$$

式中: W_a 为某种黏土矿物的相对含量分数, I_a 代表某矿物特征峰的积分面积, MIF_a 为某种矿物特征峰的强度因子, $i=1, 2, 3, \dots, N$ 表示样品中黏土矿物类型总数。伊利石、高岭石和黑云母/蛭石混层矿物的 I/MIF 分别为1、0.24和0.4(Tributh, 1989)。

黏土矿物的定性分析根据衍射峰的位置、强度、形状及宽度等参数获得(Moore and Reynolds, 1989)。伊利石化学指数(ICI)是乙二醇饱和衍射曲线上伊利石(002)5 $\text{\AA}$ 衍射峰与(001)10 $\text{\AA}$ 衍射峰面积比。伊利石结晶度(IC)则为乙二醇饱和衍射曲线上伊利石(001)10 $\text{\AA}$ 衍射峰的半宽高度,相对较高的IC值指示结晶度较差,反之结晶度较好(万琳琪等, 2020)。黏土/石英(clay/quartz)值,代表层状硅酸盐黏土矿物与

石英的比例,计算方法为黏土(10 $\text{\AA}$ +7 $\text{\AA}$)衍射峰面积与石英4.26 $\text{\AA}$ 衍射峰面积之比(Franke and Ehrmann, 2010)。

2.3 岩相分析

将固结良好的细砂质透镜体样品切割并抛光成厚度为30 μm 的标准薄切片,用于岩相分析。基于Gazzi-Dickinson点计数方法,在偏光显微镜下观察到约400个点。该设备被标识为Axioskop 40,环境温度为25 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度为30%。该分析于河北省廊坊市诚信地质服务有限公司完成。

2.4 扫描电子显微镜(SEM)分析

为获得黏土矿物的微观形貌特征,使用日本JEOL JSM 6700F场发射扫描电子显微镜(FESEM)在5.0 kV加速电压和8.1 mm物距下分析SEM图像。上述SEM测试在吉林大学无机合成与制备化学国家重点实验室完成。

2.5 高分辨率透射电子显微镜(HRTEM)分析

将研磨后的粉末过200目筛,获得小于63 μm 的粉末待用。用牙签蘸取少量小于63 μm 的粉末于酒精溶液中,并置于超声中分散10 min,用移液管吸取少量液体滴于有碳膜支撑的铜网上自然风干。使用JEOL FEI Tecnai G2 S-Twin F20对样品进行了检测。上述HRTEM测试在吉林大学无机合成与制备化学国家重点实验室完成。

3 结果

3.1 常量元素特征

罗家窝棚组的常量元素含量总体上表现出高硅富铝,贫钾贫镁贫钙低钠的特征。其中 SiO_2 含量(54.77%~69.40%)最高, Al_2O_3 (15.57%~23.03%)、 Fe_2O_3 (3.40%~8.13%)、 K_2O (2.46%~3.32%)含量次之, MgO 、 CaO 、 Na_2O 的含量均较低。与大陆上地壳(Upper Continental Crust, UCC)相比,绝大部分样品在 MgO 、 CaO 、 Na_2O 表现出显著亏损, Al_2O_3 相对富集,所有样品在 K_2O 与UCC接近(图3)。多数样品 MnO 明显富集,所有样品 SiO_2 含量几乎与UCC相当。

为直观地展现罗家窝棚组常量元素在风化过程中记录的矿物转化趋势,引用魏春艳等(2022)针对本剖面开展的前期工作中21个样品的常量元素数据,结合本文的8个样品数据进行4Si-M $^{+}$ -R $^{2+}$ 三元图解投图(图4)。图解显示罗家窝棚组样品整体表现出向4Si方向发展的趋势,表明样品经历了强烈的化

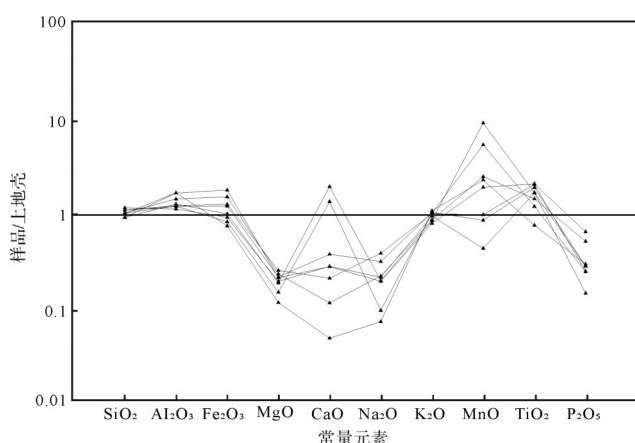
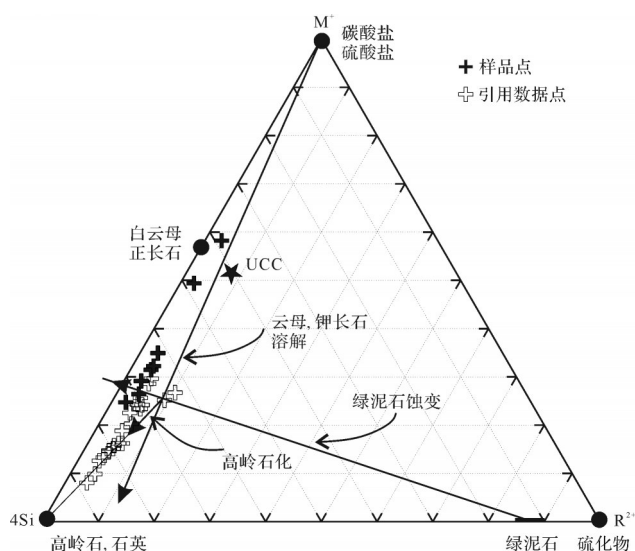


图3 罗家窝棚组常量元素标准化模式图

Fig.3 Normalized patterns for constant elements of the Luojia-wopeng Formation

图4 罗家窝棚组黏土矿物 4Si-M⁺-R²⁺ 三元图解

4Si. 硅的摩尔比除以4; M⁺. 碱性元素 (K⁺+Na⁺+2Ca²⁺) 摩尔比例和; R²⁺. 二价元素 Fe²⁺, Mg²⁺ 摩尔比例和; 21 个数据引自魏春艳等, 2022

Fig.4 Ternary diagram of 4Si-M⁺-R²⁺ clay minerals in Luojia-wopeng Formation

4Si. the molar ratio of silicon divided by 4; M⁺. the molar ratio of basic elements (K⁺+Na⁺+2Ca²⁺); R²⁺. molar ratio sum of divalent elements Fe²⁺ and Mg²⁺; 21 data cited from Wei *et al.*, 2022

学风化。与以往利用 WIP、A-CN-K、A-CN-K-FM 及 MFW 三角图解等传统风化指标得出的化学风化特征一致(魏春艳等, 2022; 孙磊, 2023)。而随着 Si 的不断富集, M⁺ 和 R²⁺ 的不断浸出, 最终导致向高岭石(4Si 顶点)的转化, 高岭石含量增加。

3.2 黏土矿物定性分析及相对含量特征

全岩矿物 XRD 分析表明罗家窝棚组的主要组成矿物为石英、钾长石、赤铁矿和高岭石, 如图 5 所示。罗家窝棚组黏土矿物 XRD 衍射图谱如图 6 所示。

10.0 Å、5.0 Å 和 3.33 Å 衍射峰位置在不同处理条件下均未发生变化, 它们分别对应于伊利石的 (001)、(002) 和 (003) 特征峰位, 指示所有样品中均含有伊利石; 7.14 Å 和 3.57 Å 峰在自然干燥片、乙二醇饱和片不发生变化, 经 HCl 片后仍未消失, K 饱和片温度升高, 至 550 °C 时彻底消失, 对应高岭石 (001)、(002) 特征峰位, 指示所有样品中含有高岭石; 由于自然干燥片、乙二醇饱和片、K-25 °C 饱和片、K-110 °C、K-300 °C 及 K-550 °C 饱和片在 14 Å 处均不存在衍射峰, 排除了绿泥石的存在; 自然干燥片 10 Å~13.10 Å 处有一宽衍射峰, 该峰为 10 Å 低角度并肩, 在 Mg-Eg 饱和片中并肩消失, 于 13.10 Å 处出现一微弱的衍射峰, 经 K-25 °C、K-110 °C 和 K-300 °C 处理后向 10 Å 收缩, 至 K-550 °C 时收缩至 10 Å, 峰形对称, 表明 N1 样品中存在少量黑云母/蛭石混层矿物(图 6)。

各黏土矿物半定量计算结果及参数特征见表 1, 结果表明罗家窝棚组样品黏土矿物相对含量以高岭石为主(57%~73%, 平均值为 64%), 伊利石(25%~41%, 平均值为 35%) 次之, 黑云母/蛭石混层矿物含量较少(0~4%, 平均值为 1%)。伊利石结晶度(0.47~0.63, 平均值为 0.55) 较高, 伊利石化学指数总体较高(0.30~0.72, 平均值为 0.50), 黏土/石英含量介于 14.41~282.77, 其中 LJWP5 和 LJWP9 的比值较低, 可能是黏土矿物分析采用研磨样品直接测试, 导致石英碎屑混入较多, 从而使比值降低。

3.3 岩相特征

罗家窝棚组细砂质透镜体主要由石英、长石、云母、岩屑和填隙物组成(图 7)。石英为他形粒状, 磨圆度差, 棱角一次棱角状, 无色透明; 长石为板条状、粒状, 磨圆度较差, 次棱角状为主, 以钾长石为主, 少量斜长石, 钾长石有土化、弱碳酸盐化蚀变; 云母为片状, 平行消光, 有弯曲曲折现象, 以黑云母为主, 少量白云母, 定向分布。其中, 黑云母显示深褐色到浅褐色的多色性。内部具有黑色和浅褐色条纹, 可能为黑云母风化形成的 Mn 和 Fe-Ti 氧、氢氧化物(Purcell *et al.*, 2015)。

3.4 SEM 特征

扫描电子显微镜能够直接观察到黏土矿物的形貌特征, 罗家窝棚组黏土矿物中伊利石边缘呈不规则状或卷曲状, 为碎屑成因(图 8a)。高岭石单晶呈假六方片状, 集合体呈书页状, 边缘形状规则(图 8b), 自形程度和结晶度较高, 为自生成因。

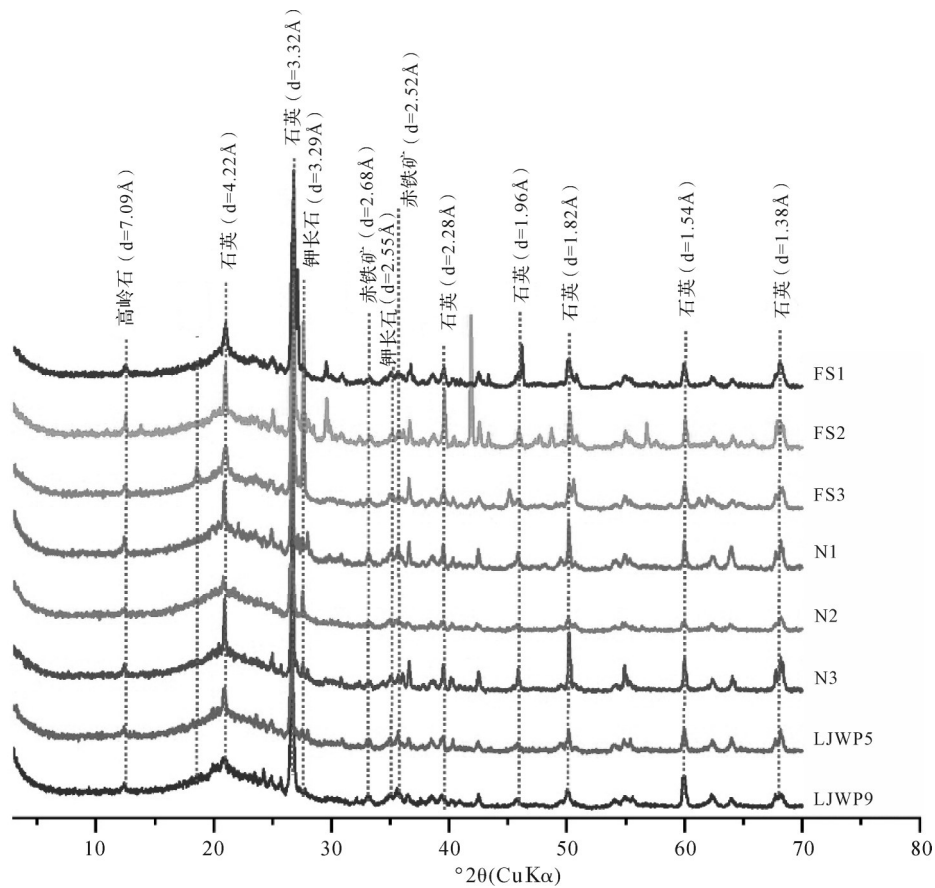


图5 罗家窝棚组全岩样品X射线衍射图

Fig.5 X-ray diffraction of whole rock samples from Luojiawopeng Formation

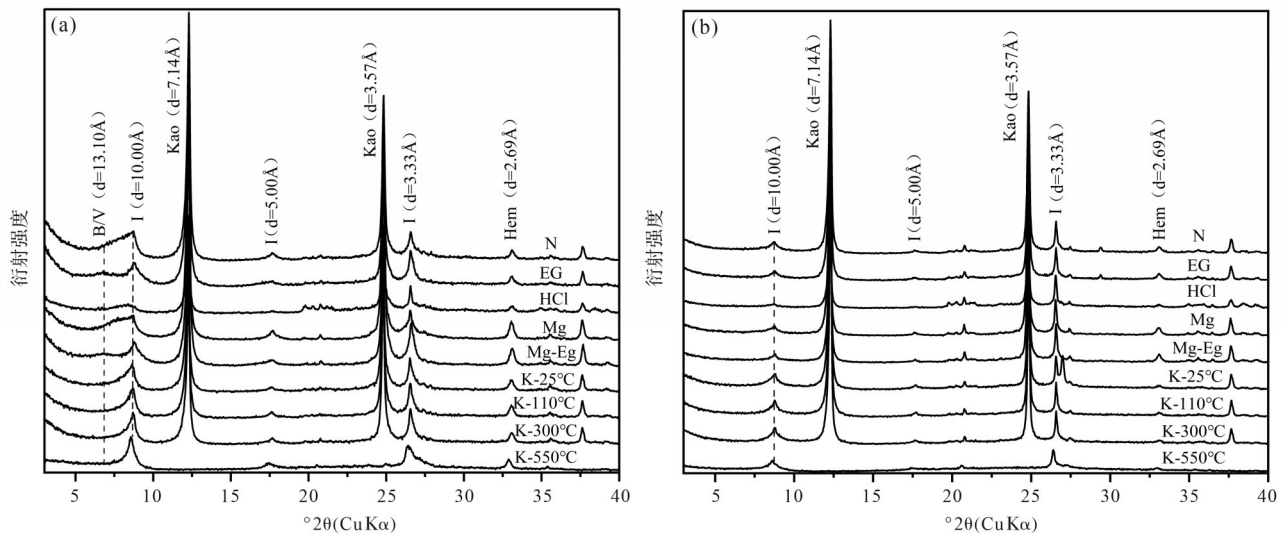


图6 罗家窝棚组样品黏土矿物X射线衍射图

(a) N1 样品; (b) FS1 样品; N. 自然干燥片; EG. 乙二醇饱和片; HCl. 盐酸片; Mg. Mg 饱和片; Mg-Eg. Mg-Eg 饱和片; K-25 °C. K-25 °C 饱和片; K-110 °C. K-110 °C 饱和片; K-300 °C. K-300 °C 饱和片; K-550 °C. K-550 °C 饱和片; Hem. 赤铁矿; I. 伊利石; Kao. 高岭石; B/V. 黑云母/蛭石混层矿物

Fig.6 Clay mineral X-ray diffraction of samples in Luojiawopeng Formation

(a) sample N1; (b) sample FS1; N. air dried; EG. ethylene-glycol saturated plate; HCl. hydrochloric acid plate; Mg. Mg saturated plate; Mg-Eg. magnesium glycol saturated plate; K-25 °C. K-25 °C saturated plate; K-110 °C. K-110 °C saturated plate; K-300 °C. K-300 °C saturated plate; K-550 °C. K-550 °C saturated plate; Hem. hematite; I. illite; Kao. kaolinite; B/V. biotite /vermiculite mixed layer minerals

表1 罗家窝棚组样品黏土矿物相对含量及特征参数						
Table 1 Relative contents and characteristic parameters of clay minerals in Luojiawopeng Formation samples						
样品	伊利石/%	黑云母/蛭石混层矿物/%	高岭石/%	伊利石结晶度	伊利石化学指数	黏土/石英
N1	38	4	59	0.51	0.52	83.80
N2	32	3	65	0.63	0.63	282.77
N3	40	3	57	0.58	0.62	97.72
FS1	28	0	72	0.53	0.72	61.31
FS2	25	1	73	0.49	0.56	196.23
FS3	36	0	64	0.56	0.30	153.79
LJWP5	37	0	63	0.47	0.35	14.41
LJWP9	41	0	59	0.60	0.31	28.75
平均值	35	1	64	0.55	0.50	114.85

3.5 HRTEM特征

通过高分辨率透射电子显微镜观察发现黏土矿物呈假六方片状(图9a),板状颗粒边缘显示出清晰的晶格条纹,晶格条纹间距为3.58 Å,与高岭石(002)层一致,亦证实罗家窝棚组黏土矿物高岭石的存在。

4 讨论

4.1 黏土矿物的物质来源及影响因素

黏土矿物颗粒细小,对外界环境较敏感,是进行古气候重建的重要指标之一。松嫩平原罗家窝棚组黏土矿物高岭石呈假六方片状,面平棱直,形状规则(图8,9),黏土矿物XRD衍射图中高岭石尖锐的7.14 Å峰说明其结晶度高(图6)。此外,该地层CIA值介于72~95(平均值为84)(魏春艳等,2022),这些特征共同表明高岭石是在地表沉积环境中经化学风化形成的,为自生成因,表明其主要受沉积过程外界环境影响,即能够反映松嫩平原罗家窝棚组沉积原位的气候特征。

罗家窝棚组黏土矿物,以高岭石为主,平均含量为64%,而伊利石含量次之,黑云母/蛭石混层矿物含量平均值仅为1%。通常,伊利石多来自母岩的物理风化过程(Chamley,1989),常由钾长石、白云母风化分解而成。含蛭石和云母晶层的混层矿物是云母类矿物蚀变或风化的产物,其中黑云母/蛭石混层矿物多来自黑云母的蚀变风化(Ramírez-Valle *et al.*,2006)。偏光显微镜显示罗家窝棚组细砂质透镜体中以石英为主,含少量钾长石和黑云母(图7),是伊利石和黑云母/蛭石混层矿物的先成矿物。上新世晚期,松辽盆地显著快速下沉,导致小兴安岭—张广才岭的花岗岩经历了一定程度的物理风化,有利于伊利石的形成(张兰生,2012),恰好对应该地层中出现的碎屑伊利石。

4Si-M⁺-R²⁺三元图解直观显示了罗家窝棚组主要先成矿物的高岭石化趋势(图4)。值得注意的是,高岭石有两种不同的形成方式。一方面,高岭石通常是炎热潮湿气候条件下,长石、云母、辉石等富铝性硅酸盐矿物经强烈化学风化和淋滤作用形成的(洪汉烈等,2010;杨佳毅等,2022)。罗家窝棚组母岩性质主要为中酸性岩石(魏春艳等,2022),含有较多石英、云母、长石类矿物,处于酸性介质条件下,有利于高岭石的形成。其中,钾长石的高岭石化是罗家窝棚组沉积区高岭石主要的潜在物源。另一方面,不同气候条件和水解环境下黏土矿物之间的相互转化也可形成高岭石。随着伊利石晶格的K⁺、Fe²⁺、Mg²⁺等阳离子不断淋失,水解作用增强,逐渐形成蒙脱石或蛭石。当气候更加湿热时,化学风化作用不断增强,黏土矿物开始高岭石化,直至层间碱金属(主要为K⁺、Na⁺)彻底淋失,常量元素表现出贫钾贫镁低钠的元素地球化学特征(图3)。罗家窝棚组黏土矿物特征为含有大量高岭石,不含蒙脱石和绿泥石而含有少量的黑云母/蛭石混层矿物,说明黏土矿物发生了强烈的高岭石化,与区域湿热气候环境对应。黑云母/蛭石混层矿物随着风化强度增强,K⁺淋失和Mg²⁺、Fe³⁺水化阳离子的积累(Cheng *et al.*,2022),逐渐转化为蛭石,最后亦可转变为高岭石。罗家窝棚组黏土矿物的转化过程主要为伊利石→高岭石和黑云母→黑云母/蛭石混层矿物→高岭石,即罗家窝棚组经历了强烈的高岭石化过程,次生黏土矿物的高岭石化记录了这一转化过程。因此,罗家窝棚组自生高岭石的物质来源不仅为长石、云母的水解蚀变作用,次生黏土矿物的地表风化和溶解重结晶也是高岭石显著增加的物质来源。

黏土矿物组成特征、形成原因及相互转化过程与所处环境密切相关,是气候和非气候因素(如物

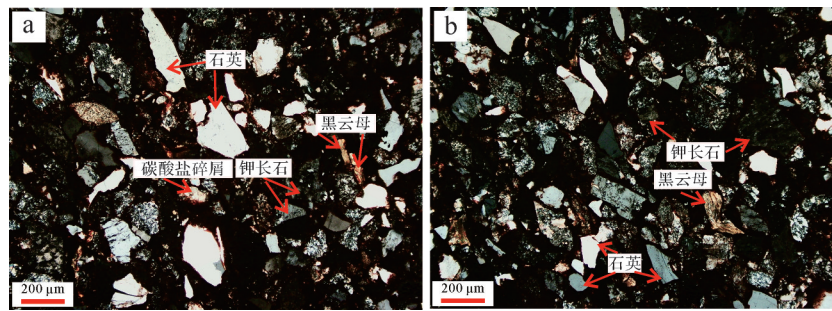


图7 罗家窝棚组样品岩石薄片特征图

Fig.7 Thin section characteristics of rock samples from Luojiawopeng Formation

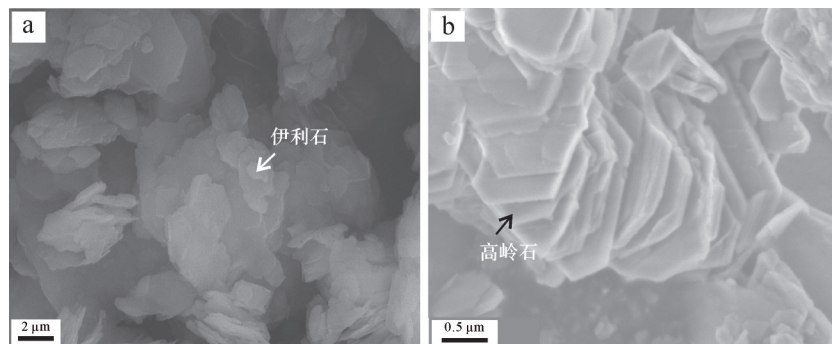


图8 罗家窝棚组黏土矿物 SEM 图

(a)细砂质透镜体,FS1样品;(b)泥质填隙物,LJWP9样品

Fig.8 Scanning electron microscopy (SEM) of clay minerals in Luojiawopeng Formation

((a) fine sandstone lenses, sample FS1; (b) muddy interstitial material, sample LJWP9)

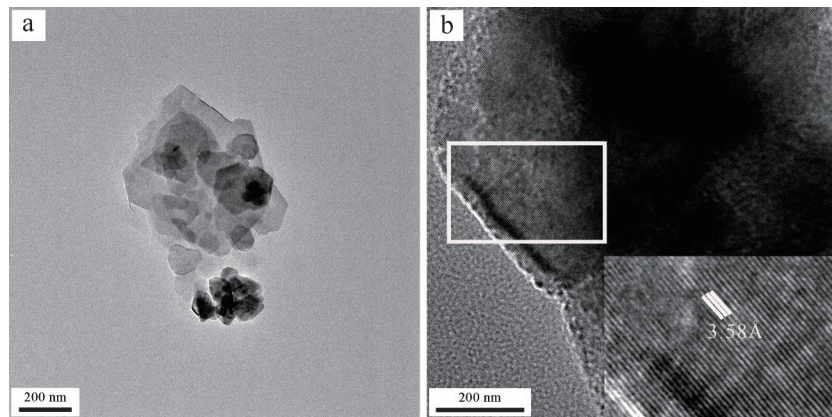


图9 罗家窝棚组黏土矿物 HRTEM 图

(a)样品泥质透镜体N1中假六方片状高岭石;(b)图a的放大,显示了高岭石在N1样品中的(002)晶格条纹

Fig.9 High-resolution transmission electron microscopy (HRTEM) images of clay minerals in Luojiawopeng Formation

(a) kaolinite showing the characteristic pseudo hexagonal plate morphology in sample N1; (b) magnification of Fig. a show lattice fringes of kaolinite (002) layers in sample N1

源、构造运动及成岩作用等)共同作用的结果。在物源和构造运动方面,罗家窝棚组沉积物较差的分选性和磨圆度等沉积学特征及潜在源区的碎屑锆石 U-Pb 年龄分析表明,罗家窝棚组主要碎屑物源为张广才岭(孙磊,2023),搬运距离较近,物质来源较稳定,对黏土矿物组成影响较小。另外,所选样品的黏土矿物组合无明显差异(表1),具有一致性也证明了

这一点。结合前人研究,认为松辽盆地自白垩世一早第三纪,大规模火山活动基本停止(李娟和舒良树,2002)。新近纪期间,喜马拉雅运动已进入第二幕,松辽盆地平原化,残留平原碎屑沉积(王五力等,2012;张海翔等,2014),松辽盆地构造格局基本稳定。因此,物源和构造运动均对罗家窝棚组黏土矿物的沉积过程影响较小。

成岩作用会改变黏土矿物的性质,是影响沉积岩中黏土矿物组合的重要因素(鲍晶等,2022)。高岭石通常来源于表生风化条件并被认为是土壤来源的矿物(Chamley, 1989),埋藏和成岩作用会将高岭石转化为绿泥石(赵杏媛和陈洪起,1988)。而罗家窝棚组中高岭石含量较高(表1),表明该地层沉积物未经过显著的埋藏,成岩作用影响微弱。

综上所述,松嫩平原罗家窝棚组黏土矿物中,伊利石为碎屑成因,高岭石为自生成因,少量的黑云母/蛭石混层矿物为黑云母碎屑风化产物,而随着地表风化强度的增加,伊利石和黑云母/蛭石混层矿物通过溶解重结晶机制不断向高岭石转化。

4.2 黏土矿物特征记录的强烈化学风化特征

黏土矿物对气候环境变化比较敏感,其矿物学特征及地球化学组成易受风化作用的影响。黑云母/蛭石混层通常形成于强烈的风化气候条件(Jeong, 2000),是黑云母蛭石化的产物。罗家窝棚组中其作为中间矿物,平均含量仅占1%,并且细砂质透镜体样品总体较泥质透镜体样品含量低,表明在黑云母蚀变过程中经历了强烈的风化,大部分细砂质透镜体样品中的黑云母淋滤完全。同时,罗家窝棚组样品正交偏光显微镜中黑云母主要呈浅褐色(图7),表明其发生了元素的淋滤过程,黑云母中的 Fe^{2+} 逐渐被氧化为 Fe^{3+} ,共同说明该地层风化水平强烈(马在平等,1996)。

伊利石结晶度和伊利石化学指数两种特征参数受沉积分异作用的影响较小(方谦等,2018),可以更好地结合黏土矿物含量指标来反映古气候演化。其中,伊利石结晶度(IC)受沉积物动态变化影响较小,能更好地记录气候信号,可以指示黏土矿物在沉积过程中的水解程度(程峰等,2014)。一般来说,较低的IC值,结晶度较高,可指示低温、干燥的气候条件,而较高的IC值反映沉积物中的伊利石形成于降雨量较高的湿热气候条件下。罗家窝棚组的伊利石结晶度平均值为0.55,为较高IC值,表明该地层黏土矿物沉积时期处于湿热的气候环境,经历了强烈的化学风化。伊利石化学指数(ICI)通常指示化学风化强度(Song *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2023),当Mg和Fe元素在晶格中取代Al时,ICI下降。当ICI小于0.5时,为富铁镁型伊利石,是强烈物理侵蚀的标志。当ICI大于0.5时,为富铝型伊利石,是强水解的产物,气候环境条件相对湿热。罗家窝棚组黏土矿物所有样品伊

利石化学指数介于0.30~0.72,多数样品ICI大于0.5,为富铝型伊利石,表明罗家窝棚组经历了强烈水解过程,气候湿热。

在潮湿气候中,相对于石英而言,更强烈的化学风化往往会导致黏土矿物的形成,而石英主要是物理风化形成的(Chamley, 1989)。黏土/石英值是推断古气候条件的一个重要指标,高值代表化学风化作用增强,气候湿润。罗家窝棚组黏土/石英值介于14.41~282.77,总体比值较高,表明该地层经历了强烈的化学风化过程,形成大量黏土矿物。

综上所述,罗家窝棚组具有一致的特征,包括伊利石结晶度增强,伊利石化学指数升高,以及较高的黏土/石英值,这些特征共同表明了强烈的化学风化和更加湿润的气候条件。

4.3 黏土矿物指示的气候意义

高岭石可能是成土作用中原位风化或中酸性母岩风化淋滤的产物,是强化学风化作用的指示,其大量出现代表该区域经历了温暖湿润的气候(Dixon *et al.*, 1990; 李晓文等, 2024)。伊利石是弱碱性条件下,以物理风化为主,干冷气候环境的产物(Chamley, 1989),因此其含量在干冷的环境中增加,在温暖湿润的环境中减少。罗家窝棚组所有黏土矿物中,以高岭石含量为主,含量平均值为64%,而伊利石含量次之,含量平均值为35%,表明罗家窝棚组处于水解作用强,化学风化强烈的沉积环境,气候炎热潮湿。

结合 $4\text{Si}-\text{M}^{+}-\text{R}^{2+}$ 三元图解(图4)表现出罗家窝棚组黏土矿物高岭石化的趋势共同说明了罗家窝棚组沉积时期处于炎热潮湿的气候环境,有大量高岭石生成。由此推测在沉积期间,可能普遍存在温暖潮湿的东亚夏季风气候,以及稳定的构造。这些条件为黏土矿物的化学风化提供了必要的时间和气候因素。

特别的,赤铁矿一般在高温和短期季节性降雨的条件下形成(Balsam *et al.*, 2004),针铁矿一般指示湿冷的环境。全岩XRD(图5)赤铁矿的出现显示罗家窝棚组沉积时期气候较为炎热,并伴有一定阶段的降雨。罗家窝棚组全岩矿物中赤铁矿/针铁矿值介于9.08~17.98,平均值为13.45(刘晓萌等, 2025),赤铁矿含量远高于针铁矿。鉴于黑云母是全岩XRD分析中主要的含铁矿物,在风化为黑云母/蛭石混层矿物过程中可能为赤铁矿的形成提供铁源。罗家窝棚

组赤铁矿和高岭石的相伴而生,可能代表着该时期降雨量和蒸发量均较大,对应着湿热的气候环境。湿热背景下,丰富的降雨量有利于高岭石的形成,而湿热背景下短暂的干旱期,被理解为与赤铁矿形成相关。

综合黏土矿物特征、赤铁矿和CIA等指标,认为罗家窝棚组经历了湿热的气候特征,是强烈的化学风化和淋滤过程的产物。但是,这既与之前的冰碛物堆积地层所反映的干冷气候矛盾,又与前人研究认为罗家窝棚组为早更新世地质时期的气候特征不符。孙磊(2023)认为罗家窝棚组沉积年龄介于2.3~2.6 Ma,甚至更老一些,地质年龄推测为早更新世,处于干热的气候环境。而上新世—更新世过渡期是新生代全球气候变化的重要拐点之一,此期气候经历了由“暖室”向“冰室”的转变,大量研究表明早更新世时期(约2.6 Ma),气候变得更加干旱并且冷暖波动较大,2.66~2.56 Ma期间的寒冷事件得到中国及世界不同地区研究结果的证实(王律江,1996;朱大岗等,2007; Meng *et al.*, 2018; 李孟, 2019; 田晏嫣等, 2020; 丁雪等, 2021)。例如,前人在山西榆社盆地和泥河湾盆地通过古气候指标均表明2.6 Ma之后,气候处于冰期环境,指示了当时影响范围广泛的干旱化事件(白云俊等, 2016; 丁国强等, 2018; 张振等, 2024)。中国北方第四纪少有红土的报道,而大量红黏土出现的地质时期主要集中在更新世之前,尤其是中新世—上新世时期(Yang *et al.*, 2018; 黄丹青, 2019; 刘实航等, 2021; 毛学刚等, 2023)。对比中国黄土高原红黏土剖面黏土矿物特征可知,灵台和朝那红黏土剖面的黏土矿物组成以伊利石为主,高岭石相对较少(Gylesjö and Arnold, 2006; Wang *et al.*, 2020),而罗家窝棚组黏土矿物以高岭石为主,伊利石次之。松嫩平原罗家窝棚组较黄土高原红黏土堆积具有较高含量高岭石,可能是缺少风成物源的稀释作用,沉积物原位风化累积的产物。黄土高原上新世红黏土剖面黏土矿物特征记录的季节性暖湿气候背景与罗家窝棚组具有可比性,因此,推测罗家窝棚组应与中国北方黄土高原红黏土形成的气候背景一致。上新世温暖期间的季风雨带更北渗透(刘实航等, 2021),为松嫩平原带来了更多降水,有利于加速其化学风化过程,由此推测罗家窝棚组形成于更新世之前,与之前地层年龄可能早于2.6 Ma的推论相一致。红层作为各个地质历史时期沉积的红色陆

相碎屑岩系的总称,通常在湿热的气候条件下红层风化和发育较快(彭华和吴志才, 2003),而罗家窝棚组特殊红层的出现也表明其处于湿热的气候条件,地层的快速风化过程促进了黏土矿物向高岭石的转化。

综上所述,本文认为罗家窝棚组的归属可能并非以往认识的早更新世,沉积环境也并非处于干热的气候条件,该地层地质年代也应该比以往推测的早更新世更早,可能是更新世之前东亚夏季风盛行的温暖湿润的时期(Wan *et al.*, 2010; 黄子晗等, 2022; 杨小强等, 2022; 张泽, 2023)。这一认识不仅丰富了罗家窝棚组的气候环境特征,而且从矿物学角度为其地层归属提供了更丰富的支撑信息。

5 结论

(1) 罗家窝棚组全岩矿物以石英、赤铁矿、钾长石为主,黏土矿物组成以高岭石为主,平均值高达64%,伊利石含量次之,黑云母/蛭石混层矿物含量最少。

(2) 罗家窝棚组黏土矿物自生高岭石含量最多,较高的伊利石结晶度、伊利石化学指数及黏土/石英比值等指标,指示其经历了强烈的化学风化和淋滤过程,记录了湿热的气候特征。同时,罗家窝棚组呈显著的高岭石化趋势,大量高岭石的存在,可能有富铝硅酸盐矿物的风化和次生黏土矿物的转化两种来源。

(3) 罗家窝棚组地质年代应该比前人推测的早更新世更早,可能为更新世之前东亚夏季风盛行的上新世,这也为进一步研究精确的地层年代提供重要信息。

致谢 全岩及黏土矿物XRD测试得到吉林大学无机合成与制备化学全国重点实验室刘晓旻教授及哈尔滨师范大学材料物理与化学重点实验室的支持帮助,元素地球化学分析在吉林大学地球科学学院完成,岩石薄片鉴定得到了河北省廊坊市诚信地质服务有限公司的大力支持,研究生孙博妍、龙艺丹、崔鑫诣、张良辰和刘晓萌参与了部分野外采样工作,研究生陶林邨、赵雅茹、孙宇佳、周莹和倪倩参与论文讨论,在此一并表示感谢。诚挚感谢论文审稿专家提出的宝贵建议和意见。

参考文献(References)

- 白云俊,魏雪苹,秦锋,等. 2016. 华北上新世—更新世过渡期植被、气候与大气CO₂研究进展[J]. 植物学报, 51(2): 257-264. [Bai Yunjun, Wei Xueping, Qin Feng, et al. 2016. Research highlights of the vegetation, climate and atmospheric CO₂ in Yushe Basin, Shanxi, North China during the Plio-Pleistocene transition[J]. Chinese Bulletin of Botany, 51(2): 257-264.]
- 鲍晶,叶程程,栗兵帅. 2022. 黏土矿物的提取、鉴定及其古气候意义:以柴达木盆地怀头他拉剖面为例[J]. 干旱区地理, 45(3): 814-825. [Bao Jing, Ye Chengcheng, Li Bingshui. 2022. Extraction, identification and paleoclimatic significance of clay minerals: A case of the Huaitoutala section in Qaidam Basin[J]. Arid Land Geography, 45(3): 814-825.]
- 曹珂,李祥辉,王成善. 2008. 四川盆地白垩系黏土矿物特征及古气候探讨[J]. 地质学报, 82(1): 115-123. [Cao Ke, Li Xianghui, Wang Chengshan. 2008. The Cretaceous clay minerals and paleoclimate in Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 82(1): 115-123.]
- 陈雷,孙景贵,陈行时,等. 2009. 张广才岭东侧英城子金矿区花岗岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 地质学报, 83(9): 1327-1334. [Chen Lei, Sun Jinggui, Chen Xingshi, et al. 2009. Zircon LA-ICP MS U-Pb dating of granite from the Yingchengzi gold deposit area in the eastern Zhangguangcailing area and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 83(9): 1327-1334.]
- 程峰,洪汉烈,顾延生,等. 2014. 广西百色盆地更新世沉积物中黏土矿物特征及其古气候指示意义[J]. 第四纪研究, 34(3): 560-569. [Cheng Feng, Hong Hanlie, Gu Yansheng, et al. 2014. Clay mineralogy and its paleoclimate interpretation of the Pleistocene sediments in Baise Basin, southern China[J]. Quaternary Sciences, 34(3): 560-569.]
- 丁国强,申改慧,李月丛,等. 2018. 泥河湾盆地上新世末期植被与气候变化的孢粉学记录[J]. 第四纪研究, 38(2): 336-347. [Ding Guoqiang, Shen Gaihui, Li Yuecong, et al. 2018. Late Pliocene palynological records of vegetation and climate changes in the Nihewan Basin[J]. Quaternary Sciences, 38(2): 336-347.]
- 丁雪,胡邦琦,徐方建,等. 2021. 晚上新世以来菲律宾海盆 XT4 孔黏土矿物特征及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 41(1): 42-51. [Ding Xue, Hu Bangqi, Xu Fangjian, et al. 2021. Evolution of clay minerals assemblages since Late Pliocene and its paleoenvironmental implications: Evidence from core XT4 of the Philippine Sea Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 41(1): 42-51.]
- 方谦,洪汉烈,赵璐璐,等. 2018. 风化成土过程中自生矿物的气候指示意义[J]. 地球科学, 43(3): 753-769. [Fang Qian, Hong Hanlie, Zhao Lulu, et al. 2018. Climatic implication of authigenic minerals formed during pedogenic weathering processes[J]. Earth Science, 43(3): 753-769.]
- 高宏宇,谢远云,迟云平,等. 2023. 哈尔滨宾县砂砾石剖面沉积物组成及碎屑锆石 U-Pb 测年:对沉积环境和区域构造演化的指示[J]. 地质科学, 58(4): 1354-1372. [Gao Hongyu, Xie Yuanyun, Chi Yunping, et al. 2023. Sedimentary composition and detrital zircon U-Pb dating of the sand gravel profile in Binxian county, Harbin: Indications for sedimentary environment and regional tectonic evolution[J]. Chinese Journal of Geology, 58(4): 1354-1372.]
- 高钰凯. 2023. 浙江新嵊盆地里半塘红土剖面的成土过程及其环境意义[D]. 上海:华东师范大学. [Gao Yukai. 2023. Soil formation process and environmental significance of Libantang red earth section in Xinsheng Basin, Zhejiang province[D]. Shanghai: East China Normal University.]
- 洪汉烈,王朝文,徐耀明,等. 2010. 青藏高原新生代以来气候环境演化的黏土矿物学特征[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 35(5): 728-736. [Hong Hanlie, Wang Chaowen, Xu Yaoming, et al. 2010. Paleoclimate evolution of the Qinghai-Tibet Plateau since the Cenozoic[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 35(5): 728-736.]
- 黄丹青. 2018. 阿尔金新近纪红粘土的古气候记录研究[D]. 西安:西北大学. [Huang Danqing. 2018. Paleoclimate records of the Neogene red clay in Altun, western China[D]. Xi'an: Northwest University.]
- 黄子晗,鹿化煜,梁承弘,等. 2022. 渭河盆地河湖沉积碳酸盐及其碳氧同位素记录的新世东亚季风气候变化[J]. 第四纪研究, 42(6): 1475-1488. [Huang Zihan, Lu Huayu, Liang Chenghong, et al. 2022. East Asian monsoon variations during the Pliocene revealed by carbonate content, carbon and oxygen isotopic compositions of the fluvial-lacustrine sediments in the Weihe Basin (central China)[J]. Quaternary Sciences, 42(6): 1475-1488.]
- 冷宇坤,谢远云,康春国,等. 2023. 哈尔滨居仁砂砾石剖面沉积特征及其环境意义[J]. 沉积学报, 41(2): 472-484. [Leng Yukun, Xie Yuanyun, Kang Chunguo, et al. 2023. Sedimentary characteristics and environmental significance of the Juren sandy gravel profile in Harbin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 41(2): 472-484.]
- 李娟,舒良树. 2002. 松辽盆地中-新生代构造特征及其演化[J]. 南京大学学报(自然科学), 38(4): 525-531. [Li Juan, Shu Liangshu. 2002. Mesozoic-Cenozoic tectonic features and evolution of the Song-Liao Basin, NE China[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 38(4): 525-531.]
- 李孟. 2019. 兰州皋兰山红黏土—黄土记录的新世—更新世转型期环境演变[D]. 兰州:兰州大学. [Li Meng. 2019. The paleoenvironmental evolution during the Pliocene-Pleistocene transition recorded by the Gaolanshan red clay-loess core in the Lanzhou Basin[D]. Lanzhou: Lanzhou University.]
- 李晓文,张春霞,张钰哲,等. 2024. 青藏高原东南缘贡觉盆地古新世—始新世极热时期黏土矿物特征及其古环境意义[J]. 第四纪研究, 44(6): 1545-1559. [Li Xiaowen, Zhang Chunxia, Zhang Yuzhe, et al. 2024. The characteristics of clay minerals and their paleoenvironmental significance during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum(PETM) in the Gonjo Basin on the southeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Quaternary Sciences, 44(6): 1545-1559.]

- 李一凡,郭懿萱,姚泾利,等. 2024. 鄂尔多斯盆地西南部三叠系延长组划分与对比关系再认识[J]. 沉积学报, 42(4): 1297-1308. [Li Yifan, Guo Yixuan, Yao Jingli, et al. 2024. Reconsideration of division and correlation of the Yanchang Formation in the southwestern Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 42(4): 1297-1308.]
- 刘建峰,迟效国,董春艳,等. 2008. 小兴安岭东部早古生代花岗岩的发现及其构造意义[J]. 地质通报, 27(4): 534-544. [Liu Jianfeng, Chi Xiaoguo, Dong Chunyan, et al. 2008. Discovery of Early Paleozoic granites in the eastern Xiao Hinggan Mountains, northeastern China and their tectonic significance[J]. Geological Bulletin of China, 27(4): 534-544.]
- 刘实航,张鹏,敖红,等. 2021. 柳林地区晚中新世—上新世红黏土磁性地层学研究[J]. 地球环境学报, 12(5): 498-509. [Liu Shihang, Zhang Peng, Ao Hong, et al. 2021. Magnetostratigraphy of Late Miocene-Pliocene red clay in Liulin area[J]. Journal of Earth Environment, 12(5): 498-509.]
- 刘硕,迟云平,郝冬梅,等. 2021. 中更新世以来松嫩平原夏季风演化:来自哈尔滨黄土的磁化率、地球化学和总有机碳记录[J]. 地质科学, 56(4): 1279-1298. [Liu Shuo, Chi Yunping, Hao Dongmei, et al. 2021. Evolution of summer monsoon in Songnen Plain since Middle Pleistocene: Magnetic susceptibility, geochemistry and total organic carbon records from Harbin loess[J]. Chinese Journal of Geology, 56(4): 1279-1298.]
- 刘晓萌,孟杰,谢远云,等. 2025. 松嫩平原东南缘罗家窝棚组陆相红层的致色机理[J]. 地球学报, 46(4): 815-826. [Liu Xiaomeng, Meng Jie, Xie Yuanyun, et al. 2025. Coloration mechanism of continental red bed in the Luojiawopeng Formation on the southeastern edge of the Songnen Plain[J]. Acta Geoscientica Sinica, 46(4): 815-826.]
- 刘志飞,赵玉龙,王轶婕,等. 2017. 南海第四纪东亚季风演化的黏土矿物指标[J]. 第四纪研究, 37(5): 921-933. [Liu Zhifei, Zhao Yulong, Wang Yijie, et al. 2017. Clay mineralogical proxy of the East Asian monsoon evolution during the Quaternary in the South China Sea[J]. Quaternary Sciences, 37(5): 921-933.]
- 吕一凡,张春霞,付扬,等. 2022. 最近 880ka 以来黄土—古土壤序列粘土矿物和粘粒地球化学特征及东亚夏季风演化[J]. 第四纪研究, 42(4): 921-938. [Lü Yifan, Zhang Chunxia, Fu Yang, et al. 2022. Clay mineralogical and geochemical record from a loess-paleosol sequence in Chinese Loess Plateau during the past 880 ka and the implication on the East Asian Summer Monsoon[J]. Quaternary Sciences, 42(4): 921-938.]
- 马在平,姜在兴,钱峥. 1996. 我国热带亚热带部分地区花岗岩和片麻岩中黑云母风化研究[J]. 矿物岩石, 16(2): 17-24. [Ma Zai-ping, Jiang Zaixing, Qian Zheng. 1996. Weathering of biotite in some weathered granite and gneiss from some subtropical and tropical area of China[J]. Mineralogy and Petrology, 16(2): 17-24.]
- 毛学刚,刘秀铭,赵景波,等. 2023. 黄土高原西部上新统风成红黏土的微形态特征及其古环境意义[J]. 第四纪研究, 43(5): 1172-1185. [Mao Xuegang, Liu Xiuming, Zhao Jingbo, et al. 2023. Micromorphology of Pliocene aeolian red clay in western Chinese Loess Plateau and its paleoenvironmental implication[J]. Quaternary Sciences, 43(5): 1172-1185.]
- 彭华,吴志才. 2003. 关于红层特点及分布规律的初步探讨[J]. 中山大学学报(自然科学版), 42(5): 109-113. [Peng Hua, Wu Zhicai. 2003. A preliminary study on the characteristics and the distribution of red beds[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 42(5): 109-113.]
- 祁帅帅,王艳鹏,彭冰柔,等. 2020. 豫西宜阳地区上二叠统孙家沟组古气候特征分析[J]. 地质学报, 94(12): 3803-3818. [Qi Shuashuai, Wang Yanpeng, Peng Bingrou, et al. 2020. Palaeo climate analysis of the Upper Permian Sunjiagou Formation in the Yiyang area, western Henan[J]. Acta geologica sinica, 94(12): 3803-3818.]
- 孙磊. 2023. 松嫩平原东部罗家窝棚组地层特征、沉积环境及其区域地质意义[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学. [Sun Lei. 2023. Stratigraphic characteristics, sedimentary environment and regional geological significance of Luojiawopeng Formation in eastern Songnen Plain[D]. Harbin: Harbin Normal University.]
- 田晏嫣,周助,迟长婷,等. 2020. 银川盆地 PL02 钻孔孢粉记录的晚上新世—早更新世时期的古气候变化周期[J]. 第四纪研究, 40(6): 1418-1430. [Tian Yanyan, Zhou Zhu, Chi Changting, et al. 2020. The paleoclimate change period of the Late Pliocene-Early Pleistocene recorded by pollen from core PL02 in Yinchuan Basin[J]. Quaternary Sciences, 40(6): 1418-1430.]
- 万琳琪,朱丽东,彭淑贞,等. 2020. 鲁中山地北麓黄土—古土壤黏土矿物组成及古环境意义[J]. 第四纪研究, 40(6): 1522-1531. [Wan Linqi, Zhu Lidong, Peng Shuzhen, et al. 2020. Clay mineral composition of loess deposits and its paleoenvironmental significance in the northern piedmont of the central Shandong mountainous region[J]. Quaternary Sciences, 40(6): 1522-1531.]
- 王春鹏,梅文博,谭章龙,等. 2023. 砂岩储层黏土矿物溶解实验研究[J]. 非常规油气, 10(6): 102-108. [Wang Chunpeng, Mei Wenbo, Tan Zhanglong, et al. 2023. Experimental study on clay mineral dissolution in sandstone reservoir[J]. Unconventional Oil & Gas, 10(6): 102-108.]
- 王律江. 1996. 上新世末~更新世初西太平洋变冷事件及其古气候意义[J]. 第四纪研究, 16(4): 300-309. [Wang Lujiang. 1996. Major temperature decrease in the western Pacific during Late Pliocene to Early Pleistocene and its paleoclimatic implications[J]. Quaternary Sciences, 16(4): 300-309.]
- 王五力,付俊彧,杨雅军. 2012. 中国东北晚中生代—新生代盆地体系构造演化及成因探讨[J]. 地质与资源, 21(1): 17-26. [Wang Wuli, Fu Junyu, Yang Yajun. 2012. Tectonic evolution and genesis of the Late Mesozoic-Cenozoic basin-and-mountain system of Northeast China[J]. Geology and Resources, 21(1): 17-26.]
- 韦恒叶,胡谍,邱振,等. 2024. 川北—鄂西上二叠统富有机质沉积与地球化学特征[J]. 沉积学报, 42(3): 774-798, 719. [Wei Hengye, Hu Die, Qiu Zhen, et al. 2024. Sedimentological and geochemical characteristics of Late Permian organic-rich rocks in north Sichuan]

- and west Hubei provinces[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 42(3): 774-798, 719.]
- 魏春艳,谢远云,康春国,等. 2022. 哈尔滨地区罗家窝棚组地层的沉积学、矿物学及地球化学特征:对沉积环境的指示[J]. *地质科学*, 57(1): 172-189. [Wei Chunyan, Xie Yuanyun, Kang Chunguo, et al. 2022. Sedimentological, mineralogical, and geochemical characteristics of the Luojiawopeng Fm. in Harbin: Implications for the sedimentary environment[J]. *Chinese Journal of Geology*, 57(1): 172-189.]
- 吴金城,叶启晓,刘文. 1984. 黑龙江省哈尔滨(荒山、顾乡屯)地区第四纪地质研究:专题科研报告[R]. 北京:全国地质资料馆. [Wu Jincheng, Ye Qixiao, Liu Wen. 1984. Quaternary geological research in Harbin (barren hills and Guxiangtun) area, Heilongjiang province: Special scientific research report[R]. Beijing: National Geological Archive.]
- 肖春晖,王永红,林间. 2022. 近1 Ma以来帕里西维拉海盆沉积物物源和古气候:粒度和黏土矿物特征的指示[J]. *沉积学报*, 40(2): 508-524. [Xiao Chunhui, Wang Yonghong, Lin Jian. 2022. Provenance and paleoclimate of sediments in the Parece Vela Basin in past 1 Ma: Inferences from grain-size and clay mineral distribution [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(2): 508-524.]
- 杨佳毅,蒋富清,颜钰,等. 2022. 上新世以来伊豆—小笠原海脊黏土矿物的来源与古气候意义[J]. *地学前缘*, 29(4): 73-83. [Yang Jiayi, Jiang Fuqing, Yan Yu, et al. 2022. Provenance and paleoclimatic significance of clay minerals from Izu-Ogasawara ridge since Pliocene[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(4): 73-83.]
- 杨小强,郑思静,闫永刚,等. 2022. 南海北部晚中新世—上新世期间碎屑物质输入对青藏高原隆升与季风演化的响应[J]. *第四纪研究*, 42(3): 650-661. [Yang Xiaoqiang, Zheng Sijing, Yan Yonggang, et al. 2022. Response of terrigenous flux to the uplift of the Tibetan Plateau and summer monsoon evolution during the Late Miocene-Pliocene in the northern South China Sea[J]. *Quaternary Sciences*, 42(3): 650-661.]
- 曾吉莉,迟云平,谢远云,等. 2026. 哈尔滨三截地砂砾石堆积地层属性特征:对地层区域划分和构造的指示[J]. *沉积学报*, 44(1): 292-307. [Zeng Jili, Chi Yunping, Xie Yuanyun, et al. 2026. Stratigraphic attribute characteristics of sand and gravel accumulation of Sanjiedi profile in Harbin, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 44(1): 292-307.]
- 张海翔,胡慧婷,李占东,等. 2014. 齐家古龙凹陷葡萄花油层顶面构造演化史研究[J]. *数学的实践与认识*, 44(22): 134-141. [Zhang Haixiang, Hu Huiting, Li Zhandong, et al. 2014. Palaeostructure recovery principles and methods: Set Qijia Gulong Sag as an example[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 44(22): 134-141.]
- 张兰生. 2012. 中国古地理:中国自然环境的形成[M]. 北京:科学出版社:310. [Zhang Lansheng. 2012. Palaeogeography of China: The formation of China's natural environment[M]. Beijing: Science Press: 310.]
- 张晓燕,张春霞,李佩. 2022. 青藏高原东缘若尔盖盆地表层沉积物黏土矿物组成及其环境意义探讨[J]. *第四纪研究*, 42(2): 435-448. [Zhang Xiaoyan, Zhang Chunxia, Li Pei. 2022. Clay mineral composition and its environmental significance of the surface sediment in the Zoigê Basin on the eastern Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 42(2): 435-448.]
- 张泽. 2023. 上新世—更新世气候转型期轨道尺度亚洲季风演化及对全球变化的响应[D]. 武汉:中国地质大学. [Zhang Ze. 2023. Orbital-scale Asian monsoon evolution and response to global change during the Pliocene-Pleistocene climate transition[D]. Wuhan: China University of Geosciences.]
- 张哲. 2018. 三水盆地下白垩统—始新统黏土矿物特征及其对区域构造—气候事件的响应[D]. 北京:中国地质大学(北京). [Zhang Zhe. 2018. Clay mineral characteristics of Sanshui Basin from Lower Cretaceous to Eocene and their response to tectonic activities and climate changes in the region[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).]
- 张振,赵永杰,刘超飞,等. 2024. 泥河湾盆地上新世—更新世过渡时期野火与植被和气候变化[J]. *第四纪研究*, 44(1): 16-28. [Zhang Zhen, Zhao Yongjie, Liu Chaofei, et al. 2024. Response of fire to vegetation and climate change during the Pliocene-Pleistocene in the Nihewan Basin[J]. *Quaternary Sciences*, 44(1): 16-28.]
- 赵启刚,朱景湖,孙孚广. 1993. 哈尔滨市志(自然地理志)[M]. 黑龙江:黑龙江人民出版社:1-463. [Zhao Qigang, Zhu Jinghu, Sun Fuguang. 1993. Physical geography of Harbin annals[M]. Heilongjiang: Heilongjiang Peoples Publishing House: 1-463.]
- 赵万苍. 2015. 东亚沙漠黏粒地球化学研究:矿物尘来源、传输及其示踪[D]. 南京:南京大学. [Zhao Wancang. 2015. Geochemistry characteristics of clay-sized fractions from East Asian desert: Mineral dust provenance, transport and tracer[D]. Nanjing: Nanjing University.]
- 赵杏媛. 1981. X射线衍射鉴别高岭石和绿泥石的联氨处理法实验[J]. *石油勘探与开发*(5): 27-33. [Zhao Xingyuan. 1981. Experiment on identification of kaolinite and chlorite by hydrazine treatment by X-ray diffraction[J]. *Petroleum Exploration and Development* (5): 27-33.]
- 赵杏媛,陈洪起. 1988. 我国含油盆地黏土矿物分布特征及控制因素[J]. *石油学报*, 9(3): 28-37. [Zhao Xingyuan, Chen Hongqi. 1988. Characteristics of the distribution of clay minerals in oil-bearing basins in China and their controlling factors[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 9(3): 28-37.]
- 朱大岗,孟宪刚,邵兆刚,等. 2007. 西藏阿里札达盆地上新世—早更新世的古植被、古环境与古气候演化[J]. *地质学报*, 81(3): 295-306. [Zhu Dagang, Meng Xiangang, Shao Zhaogang, et al. 2007. Evolution of the paleovegetation, paleoenvironment and paleoclimate during Pliocene-Early Pleistocene in Zhada Basin, Ali, Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(3): 295-306.]
- Balsam W, Ji J F, Chen J. 2004. Climatic interpretation of the Luochuan and Lingtai loess sections, China, based on changing iron oxide mineralogy and magnetic susceptibility[J]. *Earth and*

- Planetary Science Letters, 223(3/4): 335-348.
- Chamley H. 1989. Clay sedimentology[M]. Berlin, Heidelberg: Springer: 325-328.
- Cheng S, Hong H L, Ji K P, et al. 2022. New insight into biotite weathering in the subtropic Tongcheng granite regolith, Hubei province, South China[J]. Applied Clay Science, 224: 106518.
- Dixon J B, Weed S B, Parpitt R L. 1990. Minerals in soil environments [J]. Soil Science, 150(2): 562.
- Franke D, Ehrmann W. 2010. Neogene clay mineral assemblages in the AND-2A drill core (McMurdo Sound, Antarctica) and their implications for environmental change[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 286(1/2): 55-65.
- Galán E. 2006. Genesis of clay minerals[J]. Developments in Clay Science, 1: 1129-1162.
- Gylesjö S, Arnold E. 2006. Clay mineralogy of a red clay-loess sequence from Lingtai, the Chinese Loess Plateau[J]. Global and Planetary Change, 51(3/4): 181-194.
- Huang S M, Hong H L, Liao W, et al. 2020. Late Pleistocene paleo-environment of southern China: Clay mineralogical and geochemical analyses from Luna cave, Guangxi, China[J]. Quaternary International, 563: 78-86.
- Jeong G Y. 2000. The dependence of localized crystallization of halloysite and kaolinite on primary minerals in the weathering profile of granite[J]. Clays and Clay Minerals, 48(2): 196-203.
- Kahle M, Kleber M, Jahn R. 2002. Review of XRD-based quantitative analyses of clay minerals in soils: The suitability of mineral intensity factors[J]. Geoderma, 109(3/4): 191-205.
- Liu Z F, Colin C, Li X J, et al. 2010. Clay mineral distribution in surface sediments of the northeastern South China Sea and surrounding fluvial drainage basins: Source and transport[J]. Marine Geology, 277(1/4): 48-60.
- Meng X Q, Liu L W, Wang X T, et al. 2018. Mineralogical evidence of reduced East Asian Summer Monsoon rainfall on the Chinese Loess Plateau during the Early Pleistocene interglacials[J]. Earth and Planetary Science Letters, 486: 61-69.
- Moore D M, Reynolds Jr R C. 1989. X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals[M]. New York: Oxford University Press: 1-232.
- Purcell J W, Lovelace F D, Girty G H. 2015. Biotite controlled chemical alteration of granodioritic-tonalitic saprock: Exploring the use of sieving to enhance compositional linear trends[J]. Geoderma, 253/254: 90-101.
- Ramírez-Valle V, Jiménez de Haro M C, Avilés M A, et al. 2006. Effect of interlayer cations on high-temperature phases of vermiculite[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 84(1): 147-155.
- Song Y G, Wang Q S, An Z S, et al. 2018. Mid-Miocene climatic optimum: Clay mineral evidence from the red clay succession, Longzhong Basin, northern China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 512: 46-55.
- Tributh H. 1989. Qualitative und "quantitative" Bestimmung der Tonminerale in Bodentonen[M]//Tributh H, Lagaly G. Identifizierung und Charakterisierung von Tonmineralen. Giessen: 37-85.
- Wan S M, Tian J, Steinke S, et al. 2010. Evolution and variability of the East Asian Summer Monsoon during the Pliocene: Evidence from clay mineral records of the South China Sea[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 293(1/2): 237-247.
- Wang L, Jian X, Fu H J, et al. 2023. Decoupled local climate and chemical weathering intensity of fine-grained siliciclastic sediments from a paleo-megalake: An example from the Qaidam Basin, northern Tibetan Plateau[J]. Sedimentary Geology, 454: 106462.
- Wang Q, Yang S Y. 2013. Clay mineralogy indicates the Holocene monsoon climate in the Changjiang (Yangtze River) catchment, China [J]. Applied Clay Science, 74: 28-36.
- Wang Q S, Song Y G, Li Y. 2020. Clay mineralogy of the Upper Miocene-Pliocene red clay from the central Chinese Loess Plateau and its paleoclimate implications[J]. Quaternary International, 552: 148-154.
- Yang S L, Ding Z L, Feng S H, et al. 2018. A strengthened East Asian Summer Monsoon during Pliocene warmth: Evidence from 'red clay' sediments at Pianguan, northern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 155: 124-133.

Characteristics of Clay Minerals and Their Climatic Significance in Luojiawopeng Formation, Songnen Plain

ZHAO Wei¹, MENG Jie¹, XIE YuanYun¹, LI BenXian², CHI YunPing¹, SUN Lei¹, WEI ZhenYu¹,
LIU HaiJin¹, WANG YeHui¹, WU Peng³

1. College of Geographic Science, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130012, China

3. School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China

Abstract: [Objective] The Luojiawopeng Formation is a set of purplish red sand and gravel accumulation strata in the Lower Pleistocene Series in the southeastern margin of Songnen plain. The clay mineral analysis of this formation is conducive to understanding the paleoclimate characteristics in this region and defining its stratigraphic age. [Methods] Whole rock geochemistry, X-ray diffraction (XRD), Scanning electron microscopy (SEM), and High-resolution transmission electron microscopy (HRTEM) analysis of clay minerals in Luojiawopeng Formation were conducted to reveal their composition and transformation characteristics of clay minerals. Comparisons were performed on clay mineral composition between the red clays in the Chinese Loess Plateau and Luojiawopeng Formation. [Results] The clay mineral composition of Luojiawopeng Formation is dominated by kaolinite (content of 57%-73%), followed by illite (ranging from 25% to 41%), and the content of biotite /vermiculite mixed layer minerals is the least (average 1%). Kaolinite shows pseudo hexagonal morphology, and its high degree of euhedral crystallinity indicates its authigenic origin, as does its high illite crystallinity (average 0.55) and illite chemical index (average 0.50). These results, combined with the high clay to quartz ratio, indicate intense weathering characteristics. The transformation process of clay minerals is illite → kaolinite and biotite → biotite /vermiculite mixed layer minerals → kaolinite, which is consistent with the significant kaolinization trend of constant element 4Si-M⁺-R²⁺ ternary diagram. combined with the high chemical index of alteration (CIA) and hematite-to-goethite ratio of the formation, this process indicates that these minerals formed in a humid and hot environment with increasingly strong weathering. [Conclusions] Thus, the Luojiawopeng Formation was likely formed in a humid and hot climate, rather than through moraine accumulation as previously reported, and the stratigraphic chronology of the formation may be in the humid and hot period when the East Asian summer monsoon prevailed before the Early Pleistocene.

Key words: clay minerals; climatic significance; Luojiawopeng Formation; Songnen plain