

引用格式:孙杨,谢远云,迟云平,康春国,吴鹏.大兴安岭东麓龙江县白土山组地层特征:化学风化、沉积循环、源-汇体系和沉积环境[J].山地学报,2022,40(1):14-28.

SUN Yang, XIE Yuanyun, CHI Yunping, KANG Chunguo, WU Peng. Stratigraphic characteristics of the Baitushan Formation in Longjiang county, eastern foothills of the Great Xing'an Range, China: chemical weathering, sediment cycling, Source-Sink system and sedimentary environment [J]. Mountain Research, 2022, 40(1):14-28.

大兴安岭东麓龙江县白土山组地层特征: 化学风化、沉积循环、源-汇体系和沉积环境

孙杨^{1a}, 谢远云^{1a,1b*}, 迟云平^{1a,1b}, 康春国², 吴鹏^{1a}

(1. 哈尔滨师范大学 a. 地理科学学院; b. 寒区地理环境监测与空间信息服务黑龙江省重点实验室, 哈尔滨 150025;

2. 哈尔滨学院 地理系, 哈尔滨 150086)

摘要: 白土山组地层是大兴安岭东麓地区第四纪下限, 早期仅对地层的岩性特征进行了调查, 缺乏对地层全面属性的认识, 并且对其成因和沉积环境仍存在较大争议。本文选择大兴安岭东麓龙江县白土山组标准剖面为研究对象, 选取 200 块砾石进行沉积学观察, 实验进行重矿物鉴定和地球化学分析(常量、微量和稀土元素), 确定白土山组沉积物的化学风化特征、物源、沉积环境以及构造背景。结果表明: (1) 白土山组砾石分选性和磨圆度差, 经历了弱-中等的风化程度。砾石成分以流纹岩(30.65%)、脉石英(21.51%)和凝灰岩(20.97%)为主, 陆源碎屑岩和花岗岩也占一定比例。(2) 重矿物组成以钛铁矿(32.28%)、白钛石(29.05%)、绿帘石(19.77%)和锆石(6.21%)为主, 锐钛矿、赤/褐铁矿、磁铁矿和榍石也有少量出现。(3) 沉积学、重矿物和地球化学特征以及地貌证据表明, 白土山组沉积物主要是来自大兴安岭的中-酸性岩浆母岩, 受到了洪积和冲积共同作用下形成的冲洪积物, 是初次循环的结果, 沉积物堆积后经历了中等程度的化学风化。(4) 构造背景判别图解表明其构造背景为被动大陆边缘。此项研究对大兴安岭东麓地区第四纪地层划分和早更新世构造-地貌-气候-水系演化等地质事件的重建具有重要意义。

关键词: 地球化学; 沉积学; 重矿物; 化学风化; 沉积环境; 白土山组; 大兴安岭; 龙江县

中图分类号: P535

文献标志码: A

化学风化和沉积源-汇过程研究对深入了解表生地质过程、物质和能量循环以及追踪全球气候、环境演变历史, 均具有重要的指示意义^[1-4]。沉积地层记录了丰富的地表过程信息, 具有揭示过去地质过程的巨大潜力^[5]。对沉积地层的精细属性(如岩性、沉积物结构与构造、矿物学和地球化学特征)展开详细的研究, 可为重建源区古风化、分选-再循环

过程、沉积环境及构造背景提供重要线索^[5-7]。

白土山组地层主要分布在大兴安岭东麓地区, 时代为早更新世, 底界为第四纪的下限^[8-9]。对于白土山组的研究, 可以追溯到二十世纪五六十年代^[8]。白土山组地层最早是以黑龙江省龙江县白土山镇(现腰白土村)附近的白土山剖面作为模式而建立^[9], 其岩性主要为灰白色、灰黄色、黄褐色砂

收稿日期 (Received date): 2021-07-04; **改回日期** (Accepted date): 2021-12-21

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金(41871013, 41601200); 黑龙江省自然科学基金(LH2020D009)。[National Natural Science Foundation of China (41871013, 41601200); Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (LH2020D009)]

作者简介 (Biography): 孙杨(1998-)男, 黑龙江绥化人, 硕士研究生, 主要研究方向: 第四纪地质与环境变化。[SUN Yang (1998-), male, born in Suihua, Heilongjiang province, M. Sc. candidate, research on quaternary geology and environmental change] E-mail: 2179335776@qq.com

*** 通讯作者** (Corresponding author): 谢远云, 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 第四纪地质学与环境变化。[XIE Yuanyun, male, Ph. D., professor, research on quaternary geology and environmental change] E-mail: xyy0451@hrbnu.edu.cn

砾石,夹杂灰白色、青灰色黏土和泥质粉砂质极细砂透镜体^[8-12]。该地层引起了许多学者的关注,并广泛运用到东北地区地层的划分中^[8-12]。然而,前人将具有此类岩性特征的沉积物,都统称白土山组地层,这种仅依靠岩性划分地层的可靠性值得商榷。另一方面,对于白土山组地层的形成原因尚存在冰川-冰水沉积^[13-14]、河流冲-洪积^[11,15]和湖相沉积^[12,16]的争议。不同地区的白土山组地层的成因也不尽相同^[11],早期研究集中在宏观的沉积学观察(岩性、层理和砾石表面特征)方面^[11-16],缺乏对地层综合属性的分析,阻碍了对其成因的认识。

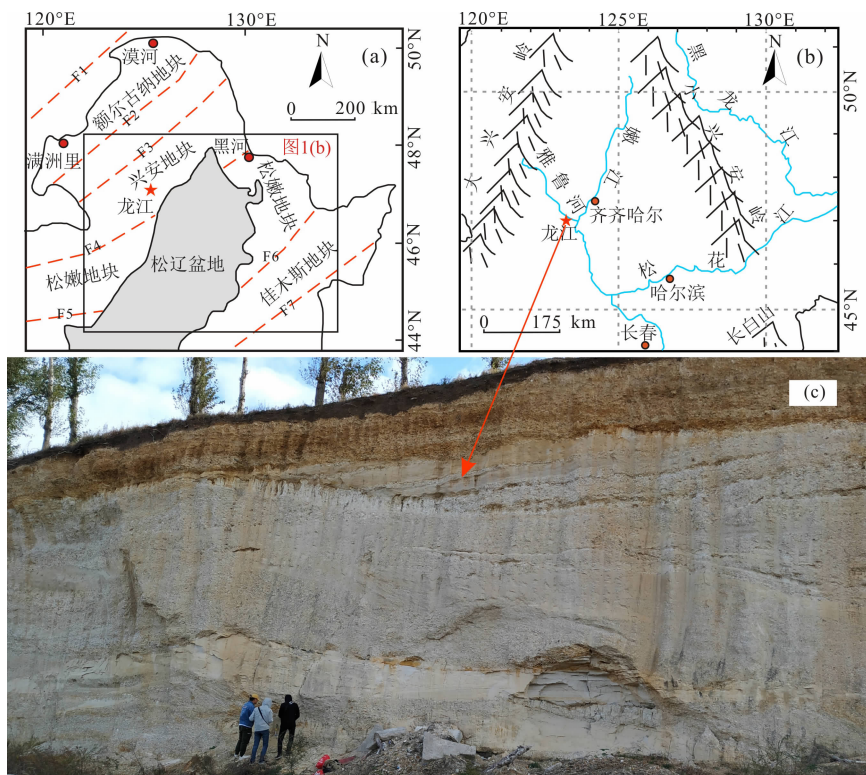
龙江县剖面作为白土山组地层的模式剖面具有典型性和代表性,对明确白土山组地层沉积物的成因和形成环境具有重要研究价值。本研究以龙江县标准白土山组地层为研究对象,建立白土山组的沉积学、矿物学和地球化学属性特征,探讨白土山组沉积物的化学风化、沉积再循环特征和母岩属性,重建源-汇关系、沉积环境和构造背景。研究对大兴安

岭东麓地区第四纪地层的划分,明确白土山组形成原因以及重建研究区古地理环境具有重要意义。同时,白土山组地层是大兴安岭东麓地区第四纪孔隙水主要含水层之一^[10],本研究对区域内工农业生产也具有重要的实践意义。

1 材料与方法

1.1 区域地质概况

大兴安岭地区处于古生代古亚洲洋构造东部与中生代环太平洋构造强烈叠加、转换的部位^[17-18],这种特殊的地理位置使该区域经历了古生代多块体拼合作用和中生代陆内演化过程的复合影响^[19]。特别是中生代以来,受蒙古-鄂霍次克洋闭合运动和太平洋西向俯冲的影响^[20],该区域出现了大量的火山盆地,并伴有强烈的中酸性的岩浆侵入和喷发^[20-21],形成了巨量的中酸性火山岩^[21],并出现了一系列近似 E-W 向、WS-EN 向的断裂构造活动带^[18-19,22-25](图 1a)。区域内第四纪沉积序列自下



注: F1. 蒙古-鄂霍茨克缝合带; F2. 德尔布干断裂带; F3. 新村一头道桥缝合带; F4. 黑河-嫩江断裂带; F5. 西拉木伦缝合带; F6. 佳木斯-伊通断裂带; F7. 敦化-密山断裂带。

图 1 龙江县腰白土村白土山组剖面示意图: (a) 大地构造位置; (b) 腰白土剖面位置; (c) 白土山组剖面照片

Fig. 1 Profile plot of the Baitushan Formation in Yaobaitu village, Longjiang county, China:

(a) tectonic location; (b) location of the Yaobaitu profile; (c) profile photograph

而上包括白土山组(Q_1^1)、平台组(Q_2^1)、大青沟组(Q_2)、顾乡屯组(Q_1^3)、群力组(Q_2^3)、大土山组(Q_1^4)、坦途组(Q_2^4)和郭家店组(Q_3^4)^[26]。

龙江县位于大兴安岭中段东麓与松嫩平原的过渡区,雅鲁河沿岸,兴安地块和松嫩地块的缝合区(黑河—嫩江断裂带)附近(图 1b)。区域地貌单元自西向东主要包括低山、丘陵和平原三部分。龙江县位于中温带地区,春季少雨干旱、风力较大;夏季受太平洋西南气流的影响,炎热短促,雨热同季;秋季气温变化迅速,易旱霜,小气候特征明显;冬季受亚洲冷高压的控制,风力持久强劲,寒冷漫长,季风性气候显著,平均气温 4.6℃。降水量西北多,东南少,年平均降水量 469.8 mm^[27],西北风为主要风向。

1.2 采样与实验过程

本研究选择齐齐哈尔龙江县腰白土村白土山组地层剖面(47°16′15″N, 123°13′36″E)作为研究对象,进行基于沉积结构与构造的沉积学观察,沉积结构包括砾石和基质性质以及夹层或透镜体在地层中的组合方式,沉积构造是对层理的观察。

首先观察剖面砾石层,布置 2 个 1.5 m × 1.5 m 范围的网格,在网格区随机选取 200 块砾石进行统计,包括砾径测量、砾态、成分观察。在野外将砾石敲开,判断其岩性和风化程度。随后对砾石层中的泥—粉砂及细砂夹层和透镜体进行取样用于重矿物鉴定和地球化学分析,其中 6 个极细砂—细砂样品用于重矿物鉴定,12 个泥质—粉砂质样品用于地球化学分析。

由于极细砂与细砂中重矿物含量最高、种类最多^[28],所以为了保证获取样品中重矿物种类更全面,重矿物样品筛取 63 ~ 250 μm 组分。首先将样品烘干并称重,使用淘洗法将重矿物部分提取出。用密度为(2.89 g · cm⁻³)的三溴甲烷分离轻、重矿物,用酒精反复洗涤,60℃恒温干燥后称重,得到重矿物含量。最后将每个样品取至少 600 粒以上,利用双目和偏光显微镜进行识别。由于样品均为同一个粒级,因此用颗粒百分比来代表体积分数,通过计算得出质量分数^[29]。

样品过 250 目筛,筛取 < 63 μm 的粒度组分进行地球化学分析。为避免矿物类型或组合的分布不均匀,导致 X 射线系数吸收差异,本研究采用玻璃熔片法进行样品制备^[30]。常量元素使用 X 射线荧

光光谱仪进行测量,分析结果绝对误差 < 3%。微量元素和稀土元素实验采用中国国家标准土壤参比样品(GSS-28)进行了校准,并使用电感耦合等离子体质谱仪(IPC-MS)进行测定^[30]。最终测定结果的相对偏差均小于 2%,具体实验过程参考文献[31]。

2 结果

2.1 沉积学特征

腰白土剖面成“穹型”暴露于地表,南北走向展布。剖面最厚处约 11.5 m(图 1c)。剖面沉积物岩性为灰白、黄褐色砂砾石堆积,夹杂灰白色黏土(图 2c)和极细砂—细砂透镜体(图 2d)及灰白色黏土夹层(图 2e)。沉积物局部可见斜层理发育(图 2f),对层理的倾伏方向进行了产状测量(152°)。

白土山组地层砾石砾径多集中于 30 ~ 60 mm,最大粒径可达 127 mm(图 3a)。砾石堆积无明显的定向排列(图 2a),磨圆度以次棱角(57.7%)和棱角(29.17%)为主(图 3b)。砾石受到了不同程度的风化作用影响(图 3c),以弱风化(76.47%)、中等风化(21.85%)为主。砾石成分主要以流纹岩(30.65%)、脉石英(21.51%)、凝灰岩(20.97%)为主(图 2b;图 3d),其次为陆源碎屑岩(15.59%)及花岗岩(11.29%)。

2.2 重矿物

检测出的重矿物有锆石、金红石、锐钛矿、白钛石、榍石、角闪石、电气石、石榴子石、绿帘石、钛铁矿、赤/褐铁矿、磁铁矿、蓝晶石、黄铁矿和自然锌共 15 种,其中角闪石、石榴子石、蓝晶石、黄铁矿和自然锌仅在个别样品中出现且含量极低,为偶见矿物。

白土山组沉积物重矿物含量占样品的 0.14%(图 4),以钛铁矿(32.28%)、白钛石(29.05%)、绿帘石(19.77%)和 ZTR(锆石 + 电气石 + 金红石, 7.09%)为主,其次为锐钛矿(3.58%)、赤/褐铁矿(2.02%)、磁铁矿(0.69%)、榍石(0.05%),其他矿物占 5.48%。

2.3 地球化学元素特征

本文对白土山组沉积物的常量元素 Si(硅)、Al(铝)、Fe(铁)、Ca(钙)、Na(钠)、K(钾)、Mg(镁)、Mn(锰)、Ti(钛)、P(磷),微量元素 Sc(钪)、V(钒)、Cr(铬)、Co(钴)、Ni(镍)、Cu(铜)、Zn(锌)、Ga(镓)、Rb(铷)、Sr(锶)、Cs(铯)、Ba(钡)、



图2 白土山组地层的沉积学特征:(a)砾石堆积特点;(b)砾石岩性;

(c)灰白色黏土透镜体;(d)极细砂-细砂质透镜体;(e)灰白色黏土夹层;(f)细颗粒沉积物中的层理

Fig.2 Sedimentological characteristics of the Baitushan Formation;

(a) gravel accumulation characteristics; (b) gravel lithology; (c) gray-white clay lens; (d) very fine sand-fine sandy lens;

(e) gray-white clay interlayer; (f) bedding in fine-grained sediments

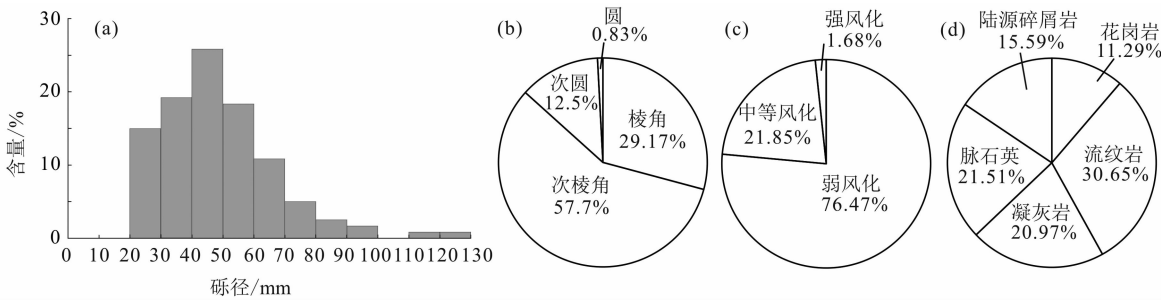


图3 白土山组砾石特征统计图:

(a)砾石a轴长度频率分布直方图;(b)砾石磨圆度;(c)砾石风化程度;(d)砾石岩性

Fig.3 Statistical diagrams of gravel characteristics of the Baitushan Formation:(a) gravel a axis length frequency

distribution histogram; (b) gravel roundness (c) gravel weathering degree; (d) lithology of gravel

Pb(铅)、Y(钇)、Zr(锆)、Nb(铌)、Hf(铪)、Ta(钽)、Th(钍)、U(铀), 稀土元素 La(镧)、Er(铒)、Ce(铈)、Dy(镝)、Pr(镨)、Lu(镥)、Nd(钕)、Eu(铕)、

Gd(钆)、Tb(铽)、Ho(钬)、Tm(铥)、Yb(镱)、Sm(钐)含量进行测试,其中常量元素以氧化物的形式表示,结果如下。

2.3.1 常量元素

沉积物常量元素以 SiO_2 (平均值为 67.21%, 下同)、 Al_2O_3 (22.78%)、 K_2O (3.65%)、 Fe_2O_3 (3.09%) 为主, 共计 96.73%, 相较于大陆上地壳 (UCC), Al_2O_3 、 TiO_2 轻度富集, Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 MnO 、 P_2O_5 明显亏损, SiO_2 、 K_2O 与 UCC 含量较为接近 (图 5a)。

2.3.2 微量元素

沉积物微量元素变化较为复杂, 与 UCC 相比 (图 5b) 过渡元素 (TTE) 中, Ga、Zn 轻度富集, Sc、Ni、Cu 总体较为亏损, 而 V (48.6 ~ 99.3)、Cr (25.2 ~ 43)、Co (4.04 ~ 30.4) 三者波动较大; 大离子亲石元素 (LILE), Cs 明显富集, Rb、Ba 总体上轻度富集, Sr 明显亏损, 而 Pb (18.2 ~ 32.3) 波动较

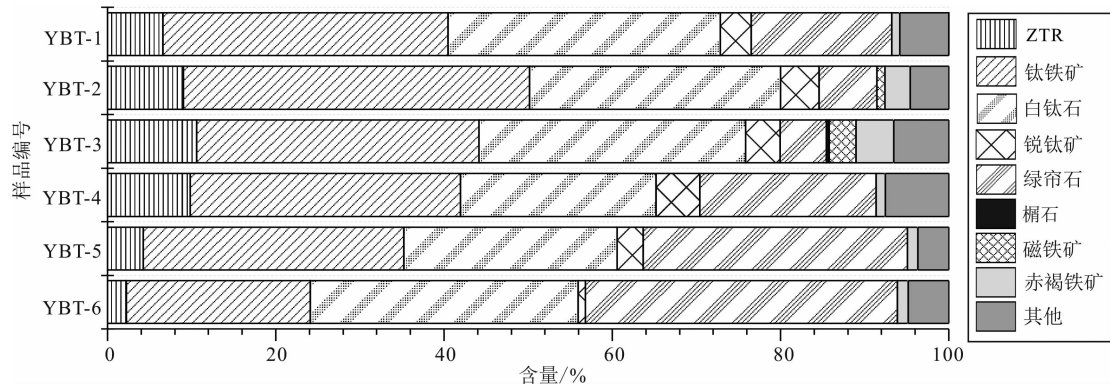
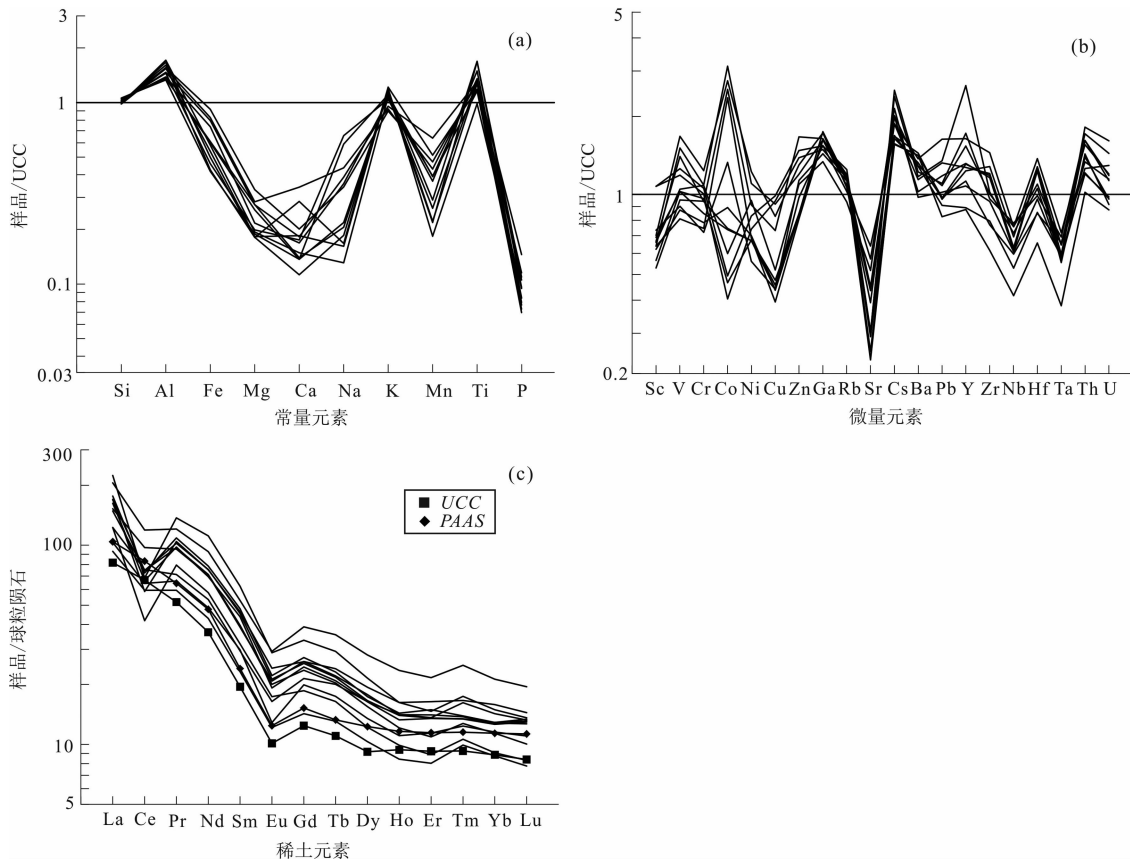


图 4 白土山组沉积物的重矿物组成

Fig. 4 Heavy mineral composition of the Baitushan Formation sediments



注: “样品/UCC”表示样品元素含量/UCC 元素含量的比值; “样品/球粒陨石”表示样品稀土元素含量/球粒陨石稀土元素含量的比值。

图 5 白土山组沉积物的元素标准化模式图解:

(a) 常量元素分配模式图; (b) 微量元素分配模式图; (c) 稀土元素分配模式图

Fig. 5 Normalized patterns for elements of the Baitushan Formation sediments: (a) major elements; (b) trace elements; (c) rare earth elements

大。高场强元素(HFSE),Y、Th、U 轻度富集,Nb、Ta 明显亏损,而 Zr(117 ~ 273)、Hf(3.81 ~ 7.92)两者波动较大。

2.3.3 稀土元素

沉积物稀土总量(Σ REE)为 150.64 ~ 325.6,平均值为 224.85,高于 UCC(146.37)^[32] 和后太古宙页岩标准值(PAAS,184.77)^[32]。稀土元素分配模式表现出与 UCC 相似的趋势,总体呈现“左陡右缓”的趋势,表明轻稀土元素(LREE)富集,重稀土元素(HREE)亏损(图 5c)。沉积物的轻稀土元素总量(Σ LREE)为 136.05 ~ 286.65,平均值为 200.63,而重稀土元素总量(Σ HREE)为 14.59 ~ 38.95, Σ LREE/ Σ HREE 为 7.36 ~ 9.33,平均值为 8.36,同样说明了相较重稀土,轻稀土富集。 $(La/Yb)_N$ 在 8.59 ~ 14.11 变动,平均值为 11.8; $(La/Sm)_N$ 在 3.46 ~ 4.16 变动,平均值为 3.78,反映轻稀土间分馏明显。样品都显示 Eu 负异常 0.53 ~ 0.71(平均值为 0.64)和 Ce 负异常 0.39 ~ 0.81(平均值为 0.62)。

3 讨论

3.1 沉积学特征对沉积环境及物源指示

沉积学主要通过沉积物的结构与构造表征沉积物的沉积环境、搬运距离和物源方向等地质信息^[33]。白土山组砾石的砾径集中在 20 和 127 mm 之间,分选性与磨圆度差(图 3a),无明显的定向排列(图 2a),表明白土山组沉积物是洪积作用的产物。然而剖面中出现的泥质-粉砂质夹层且夹层中存在明显发育的斜层理(图 2f),说明白土山组沉积物又受到了定向水流的改造。结合剖面位于大兴安岭东麓山前河流出口地带,并且在地貌上组成古冲、洪积扇,构成雅鲁河二级河流阶地,进一步证实了其成因是以洪积作用为主。白土山组地层在东北地区分布广泛,不仅分布在大兴安岭东麓,而且松嫩平原中部直至东部均发现该地层^[12]。不同的剖面位置,其形成原因也不尽相同。张庆云等^[12]将松嫩平原中部湖底黏土层下的灰白色砂、砾石堆积称为白土山组,并认为是湖相成因。但据沉积学显示,大兴安岭东麓的腰白土剖面白土山组形成原因是以洪积作用为主并受到河流作用的改造。因此,对于白土山组的成因,不能一概而论。

砾石作为构造地貌的产物,其发育经常与造山活动有关^[34]。砾石的堆积往往携带了大量的源区信息,因此可以通过砾石特征来指示物源^[35]。砾石的分选性、磨圆度以及砾径的大小可以反映水动力条件和搬运距离的远近,对指示沉积物物源具有重要意义^[35]。白土山组砾石的磨圆度以次棱角和棱角为主(图 3b),反映了砾石的搬运距离较近。砾石岩性通常可以指示沉积物源区岩石类型和地壳隆升的情况,可以有效地反映物源^[35-36]。白土山组砾石成分主要为流纹岩、脉石英、花岗岩和凝灰岩为主(图 3d),反映了源区母岩以中酸性火成岩为主,这与大兴安岭地区广泛发育中-酸性火成岩^[20-21]的情况相符合。另外,剖面沉积物层理的倾伏方向产状为 152°,指示水流来自西北,这与雅鲁河的流向相符,这表明白土山组沉积物源自西北方,经雅鲁河搬运。所以,综合沉积学特征所反映的搬运距离、母岩性质和物源方向,结合区域地质背景,推断白土山组沉积物源为大兴安岭。

3.2 化学风化特征

沉积物沉积后遭受的化学风化可能会改变沉积物的化学元素组成^[30]。化学风化强度决定了元素的丢失程度^[3],在化学风化过程中,沉积物中不稳定化学元素如 K 和 Ca 会被去除,而与之相对,较为稳定的化学元素如 Al 和 Ti 继续保留在风化产物中^[37]。化学蚀变指数(Chemical Index of Alteration, CIA)被用于衡量沉积物遭受的化学风化程度^[37]:

$$CIA = 100 \times [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \quad (1)$$

式中,CaO* 是硅酸盐中的 CaO 含量^[37],氧化物代表每个样品相应的氧化物的百分含量。CIA 值越大,表示沉积物的化学风化程度越强,其中 80 ~ 100 代表强烈风化程度;60 ~ 80 代表中等风化程度;50 ~ 60 代表低等化学风化程度。白土山组沉积物 CIA 分布范围为 70 ~ 82,平均值为 76,表明为中等程度的化学风化。化学风化指数(Chemical Index of Weathering, CIW)也常用来衡量沉积物的风化程度^[37-38]:

$$CIW = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + CaO^*)] \quad (2)$$

式中,CIW 值为 50 ~ 60,表明沉积物没有受到风化影响;CIW > 70,表明经过较强烈的化学风化。白土山组沉积物 CIW 为 80 ~ 94,平均值为 88,也说明了较高程度的化学风化。

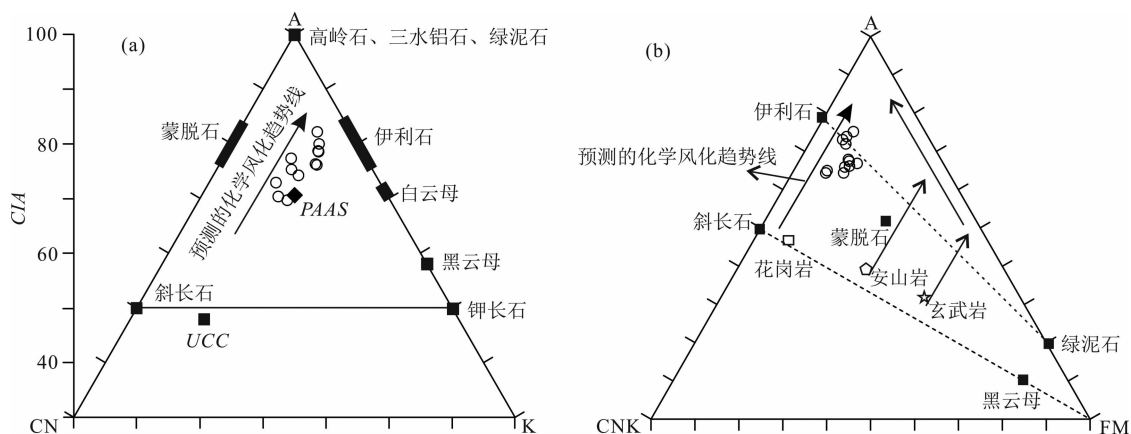
$$A-CN-K(Al_2O_3 - CaO^* + Na_2O - K_2O) \quad [37,39-40]$$

和 A-CN-K-FM ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$)^[39-40] 三元图解也常用于评估沉积物的风化程度。在 A-CN-K 三元图解中(图 6a),白土山组样品点全部集中分布在斜长石和钾长石连线上方,绝大部分样品高于 PAAS。样品点构成的风化趋势线与 A-CN 连线平行并且将要抵达 A-K 连线,这说明样品中斜长石大部分被风化消失,风化作用进入以伊利石为标志的中级阶段。同样,在 A-CN-K-FM 图中样品点全部位于斜长石与 FM 连线之上(图 6b),并达到绿泥石与伊利石连线,也表明白土山组沉积物较高的化学风化程度。综合 CIA、CIW 以及 A-CN-K 和 A-CN-K-FM 三角图解均表明白土山组沉积物经历了中等的化学风化程度。

白土山组沉积物较高的化学风化程度可以从沉积学上得到印证。砾石的风化程度可以指示沉积物的风化程度^[35],从砾石表面特征可得出,砾石受到了弱-中等风化作用影响(图 3c),由于大块的砾石比细碎屑物质的抗风化性更强,所以砾石的这种风化程度表明沉积物受到了较强的风化作用。化学风化贯穿于重矿物的剥离、搬运、沉积的全过程^[41],并对重矿物的含量和组合产生影响^[42]。白土山组沉积物的地球化学元素组成相似,砾石成分反映了源区母岩以中酸性火成岩为主,砾石磨圆度以棱角-次棱角为主,说明搬运距离较短,因此,稳定的物源与较短的搬运过程对重矿物组成影响有限,化学风化是影响重矿物组成的主要因素。不同矿物的稳定性存在差异,常见的重矿物可以分为 4 类:极稳定矿

物(锆石、金红石、电气石等)、稳定矿物(钛铁矿、石榴子石、白钛石等)、相对稳定矿物(榍石等)、不稳定矿物(角闪石、辉石等)^[43-44]。稳定重矿物由于自身性质相对稳定同时抗风化水平较高,所以在经历风化作用后得以保存;不稳定重矿物自身抗风化水平较低,在不断的风化作用下逐渐溶解^[45]。白土山组沉积物的重矿物含量表现出显著的稳定矿物(如钛铁矿、锆石)富集,而不稳定矿物(如辉石、角闪石和榍石)消失的特征(图 4),结合化学风化指标共同表明了白土山组沉积物经历了较强的化学风化。

沉积物遭受化学风化的程度可能发生于从“源”到“汇”的整个过程中^[44]。新鲜的碎屑从山体剥离时,以物理风化为主,化学风化的水平较低,特别是大兴安岭地区地处中高纬度,冬季寒冷漫长,这种气候限制了化学风化过程^[46-48],因此,白土山组沉积物高化学风化程度并不是从源区继承而来。此外,差的砾石分选性和磨圆度表明了白土山组砾石具有快速堆积和近源性的特点,因此搬运和沉积过程受到化学风化可以忽略不计。研究表明,沉积后的风化作用通过改变沉积物的矿物成分,使其不稳定矿物溶解,稳定矿物相对富集^[49-50]。白土山组样品重矿物中钛铁矿、白钛石、绿帘石和锆石为主,而角闪石、榍石等不稳定矿物几近消失。证明白土山组沉积物较强的化学风化程度不是从源区继承而来,而是沉积后形成的。此外,白土山组砾石虽经历较强程度的化学风化水平,但仍能保持完整的外形(图 2b),进一步证明了砾石沉积后就地



注:UCC 和 PAAS 值参考文献[32]。

图 6 白土山组沉积物化学风化程度判别图解:(a) A-CN-K 判别图;(b) A-CN-K-FM 判别图

Fig. 6 Discriminant diagrams for chemical weathering degree of the Baitushan Formation sediments;

(a) A-CN-K discriminant diagram; (b) A-CN-K-FM discriminant diagram

风化的模式。

3.3 分选与沉积循环过程

分选与再循环过程通过对矿物的分选而改变沉积物的地球化学组成^[51]。沉积物在搬运过程中受物理和化学作用的影响而出现分选现象^[52],这造成了沉积物中碎屑矿物(非黏土)含量的增高和黏土矿物的减少,导致某些不稳定元素的含量发生改变,从而会影响沉积物的地球化学特征。因此,识别沉积物的分选与沉积循环过程对恢复沉积物沉积过程具有重要意义^[53]。

成分变异指数(Index of Compositional Variability, ICV)常用于反映沉积物成分成熟度^[54]和区分沉积再循环过程^[55]:

$$ICV = (CaO + K_2O + Na_2O + Fe_2O_3 + MgO + TiO_2 + MnO) / Al_2O_3 \quad (3)$$

式中,ICV 越高,代表沉积物成熟度越低,当 $ICV > 1$ 表明沉积物黏土矿物较少,成熟度低,反映的是构造活动下的首次沉积; $ICV < 1$ 表明沉积物黏土矿物较多,成熟度高,说明沉积物受到了再循环作用影响或处在高化学风化程度下的初次循环^[54]。白土山组样品 ICV 在 0.34 ~ 0.5 范围内,平均值为 0.44,表明沉积物成熟度较高。结合上文提到白土山组沉积物搬运距离较近,结合剖面位置的“源-汇”关系判断,白土山组处于强化学风化下的首次循环。

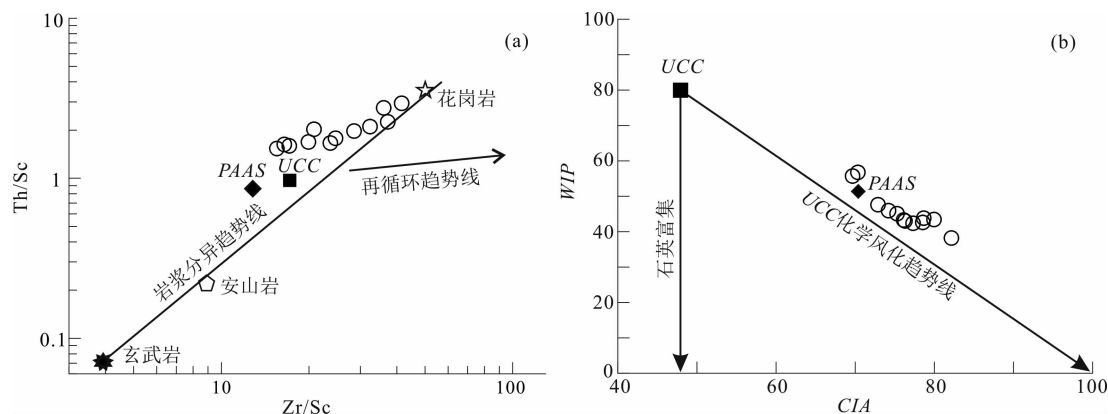
Th/Sc-Zr/Sc 二元图解是评价沉积物分选与再循环的经典地球化学手段^[7]。沉积物经历的分选及再循环作用会导致沉积物中较稳定的重矿物富

集,从而产生一些元素如 Zr、Th、Sc 的富集。Zr 主要富集在较为稳定锆石中,Th 通常富集在酸性岩中,而 Sc 则存在于镁铁质岩石中^[56]。Th/Sc 比值在沉积再循环过程中没有明显的变化,因此被用来检测母岩化学成分原始差异,可以有效地反映岩浆岩化学分异过程^[7]。当 Zr/Sc 和 Th/Sc 两者呈正相关时,即沉积物沿着岩浆成分趋势线分布^[53],说明沉积物是初次循环的产物;当 Zr/Sc 比值变化很大,而 Th/Sc 比值变化相对平缓,即沉积物偏离了岩浆成分趋势线,说明是再循环的沉积物^[30]。白土山组样品点均沿着岩浆成分趋势线分布(图 7a),表明白土山组沉积物在沉积过程中受再循环的影响较小,属于初次循环产物。

风化指数(Parker's Weathering Index, WIP)用于估算沉积物遭受的化学风化程度甚至区分沉积循环程度^[57]:

$$WIP = 100 \times (CaO^* / 0.7 + 2Na_2O / 0.35 + 2K_2O / 0.25 + MgO / 0.9) \quad (4)$$

式中,WIP 与 CIA 呈负相关关系。在研究中 WIP 常与 CIA 结合使用^[57],对于再循环沉积物 $CIA/WIP > 10$,甚至可达到 100,而初次循环沉积物, $CIA/WIP < 10$ ^[57]。在 CIA-WIP 图解中,再循环沉积物应处于石英富集趋势线和 UCC 风化趋势线之间的区域,并且随着再循环程度更高,样品点更靠近 X 轴^[58]。白土山组沉积物样品 CIA/WIP 的值为 1.24 ~ 2.15,均未超过 10,样品点位于风化线的上方并且靠近风化线(图 7b)。这些均表明白土山组属于初次循环的产物。



注:UCC 和 PAAS 值参考文献[32],岩浆岩平均组成参考文献[59]。

图 7 白土山组沉积物的初次循环和再循环判别图解:(a) Zr/Sc-Th/Sc 二元图解;(b) CIA-WIP 图解

Fig. 7 Discriminate diagrams for first-cycle and recycling of Baitushan Formation sediments;

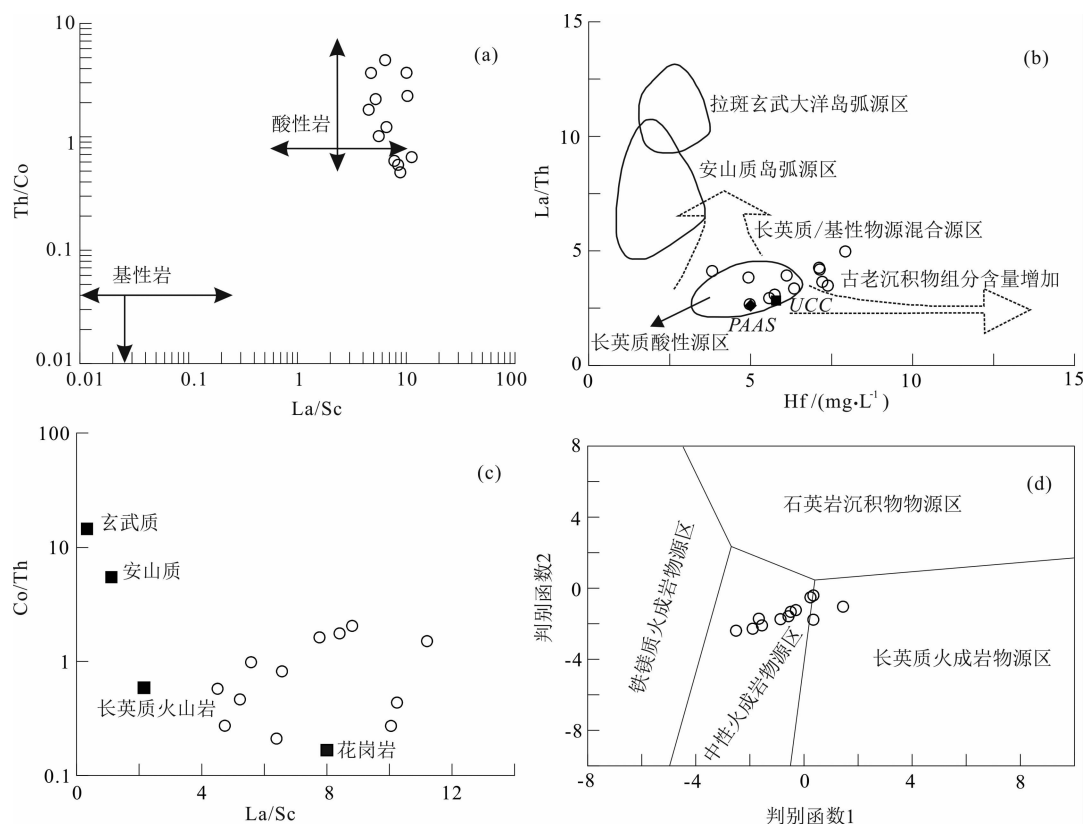
(a) Zr/Sc-Th/Sc binary diagram; (b) CIA-WIP diagram

3.4 源岩性质与构造背景分析

稀土元素 (Rare Earth Element, REE) 通常被认为具有较低的迁移率, 受迁移、沉积和成岩作用的影响很小。REE 的含量受源区岩石的丰度和化学风化程度控制。因此, REE 非常可靠地保留在沉积物中, 可以用来反映沉积物的母岩性质^[4]。Eu 负异常 (Eu/Eu^*) 可以反映源岩的组成, 通常情况下中酸性侵入岩、长英质变质岩及大陆源区的沉积岩 Eu 为负异常^[60]。白土山组沉积物 Eu 负异常 (0.53 ~ 0.71, 平均值为 0.64) 较为明显。另外 REE 也主要富集在酸性岩中, 前文提到, 白土山组沉积物 ΣREE 含量高于 UCC, 并且与 UCC 的稀土元素分配模式相似, 表明白土山组沉积物来源于上地壳且偏酸性。

一些不活动微量元素常用来指示碎屑沉积物的母岩性质。一般来说, La 和 Th 会在长英质火成岩

中富集, 铁镁质岩石中常含有 Sc、Co 等元素, 因此可以利用这些元素对源岩进行分析^[53]。白土山组沉积物 La/Sc 值为 4.15 ~ 11.2 (平均值为 7.45), Th/Co 值为 0.49 ~ 4.75 (平均值为 1.90), 在 Th/Co-La/Sc 判别图解^[61]中显示样品点均处在酸性岩一侧 (图 8a)。在 La/Th-Hf 判别图解中^[62], 绝大部分样品分布于长英质酸性源区周围 (图 8b), 整体上 La/Th 值 (2.67 ~ 4.98, 平均值为 3.71) 和 Hf 含量 (3.81 ~ 7.92, 平均值为 6.19) 较低, 表明白土山组沉积物主要为长英质岩石, 这与稀土元素的富集和 Eu 的负异常较为符合。Co/Th-La/Sc 判别图解可区分具体的岩石大类, 对源岩岩性也有较好的反映^[7], 白土山组样品分布在长英质火山岩和花岗岩之间 (图 8c)。另外, 在罗斯 (Roser) 等^[63]基于常量元素建立的四种物源属性判别图解中, 样品点绝大



注: 判别函数 1 = $30.638 \times \text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - 12.541 \times \text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}/\text{Al}_2\text{O}_3 + 7.329 \times \text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3 + 12.031 \times \text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 + 35.42 \times \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 - 6.382$;

判别函数 2 = $56.500 \times \text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - 10.879 \times \text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}/\text{Al}_2\text{O}_3 + 30.875 \times \text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3 + 5.404 \times \text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 + 11.112 \times \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 - 3.89$ 。

式中 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 表示总铁, 其余氧化物代表每个样品相应的氧化物的百分含量。

图 8 白土山组沉积物源岩属性判别图解:

(a) Th/Co-La/Sc 判别图^[61]; (b) La/Th-Hf 判别图^[62]; (c) Co/Th-La/Sc 判别图^[7]; (d) 常量元素源岩判别图^[63]

Fig. 8 Identification diagrams for source rock properties of the Baitushan Formation sediments: (a) Th/Co-La/Sc^[61];

(b) La/Th-Hf discriminant diagram^[62]; (c) Co/Th-La/Sc discriminant diagram^[7]; (d) major element source rock discriminant diagram^[63]

部分落在中性火成岩区域,少量样品位于长英质火成岩区域(图 8d)。

综合上述不活动微量元素比值和判别图解,结合白土山组砾石岩性组成中,花岗岩、流纹岩和脉石英等长英质砾石占 63.5%,表明白土山组沉积物是来自大兴安岭的中-酸性岩浆母岩。

碎屑沉积物是源区地质构造作用的产物,是源区构造演化的直接证据^[64]。碎屑沉积物的地球化学组成对源区的构造演化具有继承性,因此通常利用其地球化学组成重建源区的构造背景^[1,65-67]。常量元素的化学性质不稳定,在沉积过程中易受到风化和成岩作用的影响,极易造成误判。而不活动的微量元素(如 La、Th、Sc、Zr、Co)化学性质稳定,受风化、成岩作用影响甚微,可以准确地指示源区的构造背景^[53]。白土山组沉积物遭受了中等程度的化学风化,因此不采用常量元素进行构造背景的恢复。Th/Zr 被用于区分被动/活动大陆边缘, Th/Sc 用来区分大洋/大陆岛弧^[53]。巴蒂亚(Bhatia)^[65]建立的 La-Th-Sc 和 Th-Sc-Zr/10 图解常用来判断沉积物源区的构造背景,白土山组样品点均落在被动大陆边缘区域(图 9),这也符合大兴安岭处于板块内部,构造相对稳定的情况。

4 结论

本文对大兴安岭东麓白土山组沉积物的沉积学、矿物学和地球化学特征进行分析,得出以下

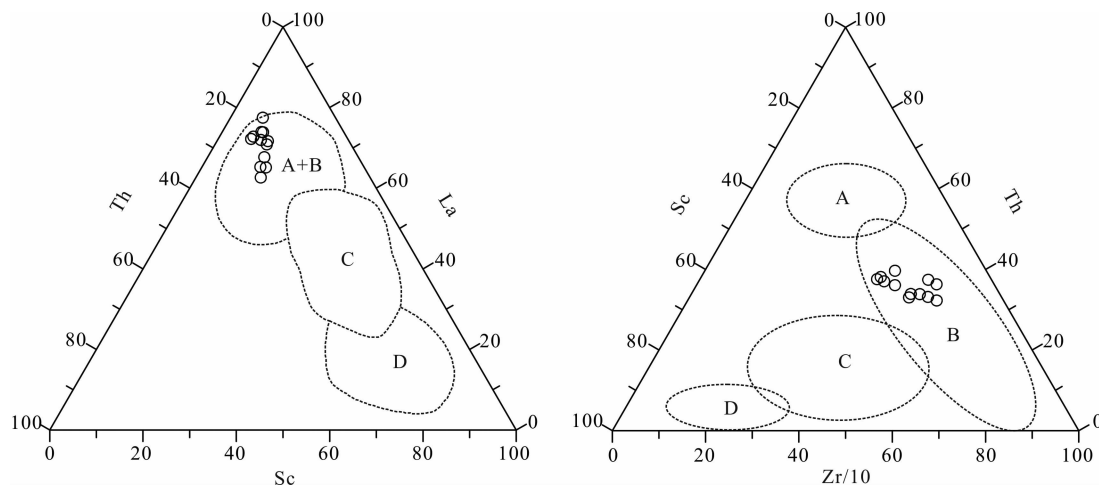
结论:

(1)白土山组沉积物岩性为灰白、黄褐色砂砾石堆积,夹杂灰白色黏土、细砂质透镜体。砾石分选,磨圆度较差,经历了较强风化作用,砾石岩性包括流纹岩(30.65%)、脉石英(21.51%)和凝灰岩(20.97%)为主,陆源碎屑岩(15.59%)和花岗岩(11.29%)也有一定比例。泥质-粉砂质透镜体斜层理发育明显。沉积学特征显示白土山组是在洪积和河流的共同作用下形成的冲洪积物。

(2)白土山组沉积物重矿物以钛铁矿(32.28%)、白钛石(29.05%)、绿帘石(19.77%)和锆石(6.21%)为主,其次为锐钛矿(3.58%)、赤/褐铁矿(2.02%)、磁铁矿(0.69%)、榍石(0.05%),其他矿物含量较少。不稳定矿物(如辉石、角闪石和榍石)未被发现,指示了白土山组沉积物很高的化学风化程度。

(3)白土山组沉积物较高的 CIA、CIW 值及 A-CN-K、A-CN-K-FM 图解,共同表明沉积物经历了中等程度的化学风化。ICV 指数与 Th/Sc-Zr/Sc、CIA-WIP 图解指示,白土山组沉积物成熟度较高,为初次循环的产物。

(4)砾石岩性、稀土元素分配模式和不活动元素比值 La/Sc-Th/Co、La/Th-Hf、Co/Th-La/Sc 以及常量元素判别函数图解分析结果表明,白土山组沉积物主要是来大兴安岭的中-酸性岩浆母岩。La-Th-Sc 和 Th-Sc-Zr/10 构造背景判别图解表明其构造背景为被动大陆边缘。



注: A. 活动大陆边缘; B. 被动大陆边缘; C. 大陆岛弧; D. 大洋岛弧。

图 9 白土山组沉积物大地构造背景判别图解^[65]

Fig. 9 Discriminant diagrams of tectonic setting of the Baitushan Formation sediments

致谢:这项研究得到了哈尔滨师范大学硕士研究生学术创新项目(HSDSSCX2021-22)的资助,感谢中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室黄俊华研究员参与完成地球化学元素实验,河北廊坊诚信地质公司的张佩莹、李鹏和张云丹参与完成重矿物实验,研究生孙磊、魏振宇、孙建华、张瑞和冷宇坤参加了部分野外取样工作,研究生刘硕、赵倩、李思琪、侯心如、李秋杭、汪进秋、徐园园和魏春艳参与了实验室样品处理工作,一并表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] NESBITT H W, YOUNG G M. Petrogenesis of sediments in the absence of chemical weathering: Effects of abrasion and sorting on bulk composition and mineralogy [J]. *Sedimentology*, 1996, **43**: 341-358. DOI: 10.1046/j.1365-3091.1996.d01-12.x
- [2] NESBITT H W, FEDO C M, YOUNG G M. Quartz and feldspar stability, steady and non-steady-state weathering, and petrogenesis of siliciclastic sands and muds [J]. *The Journal of Geology*, 1997, **105**: 173-192.
- [3] ARMSTRONG-ALTRIN J S. Provenance of sands from Cazon, Acapulco, and Bahia Kino beaches, Mexico [J]. *Revista Mexicana De Ciencias Geologicas*, 2009, **26**(3): 764-782.
- [4] BAIYEGUNHI C, LIU K, GWAVAVA O. Geochemistry of sandstones and shales from the Ecca Group, Karoo Supergroup, in the eastern cape province of south Africa: Implications for provenance, weathering and tectonic setting [J]. *Open Geosciences*, 2017, **9**(9): 340-360. DOI: 10.1515/geo-2017-0028
- [5] XIE Yuanyun, YUAN Fang, ZHAN Tao, et al. Geochemistry of loess deposits in northeastern China: Constraint on provenance and implication for disappearance of the large Songliao palaeolake [J]. *Journal of the Geological Society*, 2017, **175**(1): 146-162. DOI: 10.1144/jgs2017-032
- [6] BHATIA M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control [J]. *Sedimentary Geology*, 1985, **45**(1-2): 97-113. DOI: 10.1016/0037-0738(85)90025-9
- [7] MCLENNAN S M, HEMMING S, MCDANIEL D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics [J]. *Geological Society of America Special Paper*, 1993, **284**: 21-40. DOI: 10.1130/SPE284-p21
- [8] 裘善文, 张爱新, 夏玉梅, 等. 东北白土山冰期的商榷[J]. *冰川冻土*, 1983, **5**(2): 13-22. [QIU Shanwen, ZHANG Aixin, XIA Yumei, et al. A discussion on the Baitushan ice age in northeast China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, **5**(2): 13-22]
- [9] 裘善文, 王锡魁, 李取生. 伊通火山群地区“白土山组”地层研究新进展[J]. *地层学杂志*, 2001, **25**(4): 279-282. [QIU Shanwen, WANG Xikui, LI Qusheng. New advances in the stratigraphic study on the “Baitushan Formation” of the Yitong volcanic area [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2001, **25**(4): 279-282] DOI: 10.3969/j.issn.0253-4959.2001.04.007
- [10] 裘善文, 李风华. 东北“白土山冰期”沉积物成因与时代的研究[J]. *冰川冻土*, 1985, **7**(3): 195-203. [QIU Shanwen, LI Fenghua. Studies on genesis and time of the deposits of “The Baitushan Ice Age” in northeast China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1985, **7**(3): 195-203]
- [11] 裘善文, 夏玉海, 汪佩芳, 等. 松辽平原更新世地层及其沉积环境的研究[J]. *中国科学(B辑)*, 1988(4): 431-441. [QIU Shanwen, XIA Yuhai, WANG Peifang, et al. Study on pleistocene strata and sedimentary environment in Songliao Plain [J]. *Science China (B)*, 1988(4): 431-441]
- [12] 张庆云, 林泽蓉. 白土山组堆积物成因的讨论[J]. *长春地质学院学报*, 1981(4): 89-96. [ZHANG Qingyun, LIN Zerong. Discussion on the genesis of the Baitushan Formation sediments [J]. *Journal of Changchun Institute of Geology*, 1981(4): 89-96]
- [13] 严钦尚. 大兴安岭附近冰川地形[J]. *地质学报*, 1952, **32**(1-2): 1-15. [YAN Qinchang. Glacier landform near the Great Xing'an Range [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1952, **32**(1-2): 1-15]
- [14] 杨怀仁. 诺敏河流域的冰川地形[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 1955(1): 95-120. [YANG Huairan. Glacial landforms in the Nuomin River basin [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 1955(1): 95-120]
- [15] 王庆, 杨景春. 松辽分水岭东段白土山组成因与时代[J]. *地层学杂志*, 1995, **19**(4): 287-290. [WANG Qing, YANG Jingchun. Genesis and age of the Baitushan Formation in the eastern part of the Songliao Watershed [J]. *Journal of Stratigraphy*, 1995, **19**(4): 287-290] DOI: 10.19839/j.cnki.dcxz.1995.04.007
- [16] 程新民. 吉林省伊通地区白土山组地层的重新厘定[J]. *吉林地质*, 1990(1): 69-73. [CHENG Xinmin. A review on the Baitushan Formation in Yitong region, Jilin province [J]. *Jilin Geology*, 1990(1): 69-73]
- [17] 梁琛岳, 刘永江, 李伟, 等. 大兴安岭北段伸展隆升样式: 来自科洛—嘎拉山韧性变形带的证据[J]. *岩石学报*, 2018, **34**(10): 2873-2900. [LIANG Chenyue, LIU Yongjiang, LI Wei, et al. The extensional uplift style of north part of the Da Hinggan Mountains: Evidences from ductile deformation zone of Keluo-Galashan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, **34**(10): 2873-2900]
- [18] ZHAO X, COE R S, GILDER S A, et al. Palaeomagnetic constraints on the palaeogeography of China: Implications for Gondwanaland [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1996, **43**(6): 643-672. DOI: 10.1080/08120099608728285

- [19] 李永飞, 邵晓勇, 卞雄飞, 等. 大兴安岭北段龙江盆地中生代火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义 [J]. 地质通报, 2013, **32**(8): 1195 - 1211. [LI Yongfei, GAO Xiaoyong, BIAN Xiongfei, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of the Mesozoic volcanic rocks from Longjiang basin in northern Da Hinggan Mountains and their geological implications [J]. Geological Bulletin of China, 2013, **32**(8): 1195 - 1211] DOI: 10.3969/j.issn.1671-2552.2013.08.006
- [20] 赵勇伟, 樊祺诚. 大兴安岭哈拉哈河—绰尔河第四纪火山岩地幔源区与岩浆成因 [J]. 岩石学报, 2012, **28**(4): 1119 - 1129. [ZHAO Yongwei, FAN Qicheng. Mantle sources and magma genesis of quaternary volcanic rocks in the Halaha River and Chaoer River area, Great Xing'an Range [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, **28**(4): 1119 - 1129]
- [21] 邵济安, 张履桥, 牟保磊. 大兴安岭中生代伸展造山过程中的岩浆作用 [J]. 地学前缘, 1999, **6**(4): 339 - 346. [SHAO Ji'an, ZHANG Lyuqiao, MU Baolei. Magmatism in the mesozoic extending orogenic process of Da Hinggan Mts. [J]. Earth Science Frontiers, 1999, **6**(4): 339 - 346]
- [22] 葛肖虹, 马文璞. 东北亚南区中—新生代大地构造轮廓 [J]. 中国地质, 2007, **34**(2): 212 - 228. [GE Xiaohong, MA Wenpu. Mesozoic - Cenozoic tectonic frame work of southern Northeast Asia [J]. Geology in China, 2007, **34**(2): 212 - 228]
- [23] 李锦轶, 张进, 杨天南, 等. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2009, **39**(4): 584 - 605. [LI Jinyi, ZHANG Jin, YANG Tiannan, et al. Crustal tectonic division and evolution of the southern part of the north Asian orogenic region and its adjacent areas [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, **39**(4): 584 - 605] DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.2009.04.008
- [24] 钱程, 秦涛, 李林川, 等. 大兴安岭北段东坡扎兰屯地区高位砂砾石层研究及其地质意义 [J]. 地质与资源, 2016, **25**(5): 424 - 435. [QIAN Cheng, QIN Tao, LI Linchuan, et al. Study on the highstand sand-gravel layers in Zalantun area, northern Daxinganling Mountains: Geological implication [J]. Geology and Resources, 2016, **25**(5): 424 - 435] DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2016.05.002
- [25] 贺宏云, 李英雷, 刘汇川, 等. 大兴安岭东南段中三叠世岩浆岩年代学、地球化学特征及其对古亚洲洋构造演化时限的制约 [J]. 地质通报, 2020, **39**(7): 1046 - 1061. [HE Hongyun, LI Yinglei, LIU Huichuan, et al. Geochronology and geochemistry of the Middle Triassic magmatic rocks in the southeastern part of the Da Hinggan Mountains and their constraints on the tectonic evolution of Paleo - Asian Ocean [J]. Geological Bulletin of China, 2020, **39**(7): 1046 - 1061]
- [26] 孙建中, 王雨灼, 张庆云. 松辽平原第四纪地层的划分——几种年代学方法的应用 [J]. 长安大学学报 (地球科学版), 1982(2): 79 - 91. [SUN Jianzhong, WANG Yuzhuo, ZHANG Qingyun. Division of quaternary stratigraphy in Songliao Plain: Application of several chronological methods [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 1982(2): 79 - 91] DOI: 10.19814/j.jese.1982.02.012
- [27] 娄德君, 李治民, 王冀, 等. 近 50 a 齐齐哈尔市极端气候事件特征分析 [J]. 黑龙江气象, 2009, **26**(1): 6 - 9. [LOU Dejun, LI Zhimin, WANG Ji, et al. Analysis of Qiqihar extreme climate events during 1951 ~ 2006 [J]. Heilongjiang Meteorology, 2009, **26**(1): 6 - 9] DOI: 10.14021/j.cnki.hljqx.2009.01.003
- [28] 王孟瑶, 金秉福, 王昕, 等. 废黄河口门外砂质海滩粒度和重矿物特征及其成因机理分析 [J]. 海洋科学, 2019, **43**(1): 50 - 60. [WANG Mengyao, JIN Bingfu, WANG Xin, et al. Characteristics of grain size and heavy minerals of sandy beach outside the abandoned Yellow River Estuary and its genetic mechanism [J]. Marine Sciences, 2019, **43**(1): 50 - 60] DOI: 10.11759/hyxx20180827001
- [29] 康春国, 李长安, 王节涛, 等. 江汉平原沉积物重矿物特征及其对三峡贯通的指示 [J]. 地球科学 (中国地质大学学报), 2009, **34**(3): 419 - 427. [KANG Chunguo, LI Changan, WANG Jietao, et al. Heavy minerals characteristics of sediments in Jianghan Plain and its indication to the forming of the Three Gorges [J]. Earth Science - Journal of China University of Geosciences, 2009, **34**(3): 419 - 427] DOI: 10.3321/j.issn:1000-2383.2009.03.006
- [30] 袁方, 谢远云, 詹涛, 等. 地球化学组成揭示的杜蒙沙地化学风化和沉积再循环特征及其对风尘物质贡献的指示 [J]. 地理科学, 2017, **37**(12): 1885 - 1893. [YUAN Fang, XIE Yuanyun, ZHAN Tao, et al. Source-area weathering and recycled sediment for Dumeng Sandy Land inferred from geochemistry compositions: Implication for contribution to aeolian dust [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, **37**(12): 1885 - 1893] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2017.12.012
- [31] YANG Xiaoping, LIU Yongsheng, LI Chaozhu, et al. Rare earth elements of aeolian deposits in northern China and their implications for determining the provenance of dust storms in Beijing [J]. Geomorphology, 2007, **87**(4): 365 - 377. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.10.004
- [32] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: Its composition and evolution [M]. London: Oxford Blackwell, 1985: 312.
- [33] 王宏语, 李瑞磊, 朱建峰, 等. 陆相裂谷盆地构造沉积学特征: 以松辽盆地伏龙泉断陷为例 [J]. 现代地质, 2019, **33**(6): 1151 - 1162. [WANG Hongyu, LI Ruilei, ZHU Jianfeng, et al. Tectonic sedimentology characteristics of continental rift basin: Case study from Fulongquan fault depression of Songliao Basin [J]. Geoscience, 2019, **33**(6): 1151 - 1162] DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2019.06.02
- [34] 吴鹏, 谢远云, 康春国, 等. 早更新世晚期松花江水系袭夺: 地

- 球化学和沉积学记录[J]. 地质学报, 2020, **94**(10): 3144 – 3160. [WU Peng, XIE Yuanyun, KANG Chunguo, et al. The capture of the Songhua River system in the late Early Pleistocene: Geochemical and sedimentological records [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, **94**(10): 3144 – 3160] DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020037
- [35] 刘聃, 陈汉林, 林秀斌, 等. 南天山西部山前新生代晚期三期构造活动: 来自乌鲁木齐剖面砾石统计的证据[J]. 岩石学报, 2012, **28**(8): 2414 – 2422. [LIU Dan, CHEN Hanlin, LIN Xiubin, et al. Three episodes of tectonism in western South Tian Shan during late Cenozoic: Evidences from gravel counting in Wuluqeqiati sedimentary succession [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, **28**(8): 2414 – 2422]
- [36] 王节涛, 裴来政, 张宏鑫, 等. 大别山南麓阳逻组砾石层砾石形貌学研究[J]. 中国地质, 2021, **48**(1): 139 – 148. [WANG Jietao, PEI Laizheng, ZHANG Hongxin, et al. Morphology of gravels from the Yangluo Formation in the southern piedmont of Dabie Mountains [J]. Geology in China, 2021, **48**(1): 139 – 148] DOI: 10.12029/gc20210110
- [37] NESBITT H W, YOUNG G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. Nature, 1982, **299**(5885): 715 – 717. DOI: 10.1038/299715a0
- [38] HARNOLIS L. The CIW index: A new chemical index of weathering [J]. Sedimentary Geology, 1988, **55**: 319 – 322. DOI: 10.1016/0037-0738(88)90137-6
- [39] NESBITT H W, YOUNG G M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1984, **48**(7): 1523 – 1534. DOI: 10.1016/0016-7037(84)90408-3
- [40] NESBITT H W, YOUNG G M. Formation and diagenesis of weathering profiles [J]. The Journal of Geology, 1989, **97**(2): 129 – 147.
- [41] NIE Junsheng, PENG Wenbin, PFAFF K, et al. Controlling factors on heavy mineral assemblages in Chinese loess and Red Clay [J]. Palaeogeography, Palaeo-climatology, Palaeoecology, 2013, **381** – **382**: 110 – 118. DOI: 10.1016/j.palaeo.2013.04.020
- [42] 许苗苗, 魏晓椿, 杨蓉, 等. 重矿物分析物源示踪方法研究进展[J]. 地球科学进展, 2021, **36**(2): 154 – 171. [XU Miaomiao, WEI Xiaochun, YANG Rong, et al. Research progress of provenance tracing method for heavy mineral analysis [J]. Advances in Earth Science, 2021, **36**(2): 154 – 171] DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2021.021
- [43] MORTON A C, HALLSWORTH C. Stability of detrital heavy minerals during burial diagenesis [J]. Developments in Sedimentology, 2007, **58**: 215 – 245. DOI: 10.1016/S0070-4571(07)58007-6
- [44] 杨江海, 马严. 源—汇沉积过程的深时古气候意义[J]. 地球科学, 2017, **42**(11): 1910 – 1921. [YANG Jianghai, MA Yan. Paleoclimate perspectives of source-to-sink sedimentary processes [J]. Earth Science, 2017, **42**(11): 1910 – 1921] DOI: 10.3799/dqkx.2017.121
- [45] 曾方倡, 姜楷, 黄超, 等. 砂岩中重矿物的成因意义[J]. 四川地质学报, 2020, **40**(1): 26 – 29. [ZENG Fanglyu, JIANG Kai, HUANG Chao, et al. Genetic significance of heavy minerals in sandstone [J]. Acta Geologica Sichuan, 2020, **40**(1): 26 – 29] DOI: 10.3969/j.issn.1006-0995.2020.01.006
- [46] CAMPODONICO V A, ROUZAUT S, PASQUINI A I. Geochemistry of a Late Quaternary loess-paleosol sequence in central Argentina: Implications for weathering, sedimentary recycling and provenance [J]. Geoderma, 2019, **351**: 235 – 249. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.04.024
- [47] 马力, 郝立波, 潘军, 等. 大兴安岭阿龙山地区流纹岩风化的地球化学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, **33**(3): 296 – 299. [MA Li, HAO Libo, PAN Jun, et al. Geochemistry of rhyolite weathering of Alongshan, Greater Xing'an Mountains [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, **33**(3): 296 – 299] DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.2003.03.007
- [48] 郝立波, 陆继龙, 马力. 浅覆盖区土壤化学成分与基岩化学成分的关系及其意义——以大兴安岭北部地区为例[J]. 中国地质, 2005, **32**(3): 447 – 482. [HAO Libo, LU Jilong, MA Li. Relation between the chemical compositions of residual soils and bedrocks in shallow overburden areas and its significance: A case study of the northern Da Hinggan Mountains [J]. Geology in China, 2005, **32**(3): 447 – 482]
- [49] MORTON A C, HALLSWORTH C R. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones [J]. Sedimentary Geology, 1999, **124**: 3 – 29. DOI: 10.1016/S0037-0738(98)00118-3
- [50] MORTON A, HURST A. Correlation of sandstones using heavy minerals: An example from the Statfjord Formation of the Snorre Field, northern North Sea [J]. Geological Society London Special Publications, 1995, **89**(1): 3 – 22. DOI: 10.1144/gsl.sp.1995.089.01.02
- [51] CONDIE K C. Another look at rare earth elements in shales [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991, **55**(9): 2527 – 2531. DOI: 10.1016/0016-7037(91)90370-k
- [52] SCHNEIDER S, HORNUNG J, HINDERER M, et al. Petrography and geochemistry of modern river sediments in an equatorial environment (Rwenzori Mountains and Albertine rift, Uganda): Implications for weathering and provenance [J]. Sedimentary Geology, 2016, **336**: 106 – 119. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2016.02.006
- [53] 王彤, 朱筱敏, 董艳蕾, 等. 基于微量元素分析的古沉积背景重建——以准噶尔盆地西北缘古近系安集海河组为例[J]. 地质学报, 2020, **94**(12): 3830 – 3851. [WANG Tong, ZHU Xiaomin, DONG Yanlei, et al. Trace elements as paleo sedimentary environment indicators: A case study of the Paleogene

- Anjihaihe Formation in the northwestern Junggar basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, **94**(12): 3830 – 3851. DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020045
- [54] COX R, LOWE D R, CULLERS R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, **59**(14): 2919 – 2940. DOI: 10.1016/0016-7037(95)00185-9
- [55] CULLERS R L, PODKOYVROV V N. Geochemistry of the Mesoproterozoic Lakhanda shales in southeastern Yakutia, Russia: Implications for mineralogical and provenance control, and recycling [J]. *Precambrian Research*, 2000, **104**(1): 77 – 93. DOI: 10.1016/S0301-9268(00)00090-5
- [56] MCLENNAN S M, TAYLOR S R, MCCULLOCH M T, et al. Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: Crustal evolution and plate tectonic associations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, **54**(7): 2015 – 2050. DOI: 10.1016/0016-7037(90)90269-Q
- [57] GARZANTI E, PADOAN M, SETTI M, et al. Weathering geochemistry and Sr-Nd fingerprints of equatorial upper Nile and Congo muds [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, **14**(2): 292 – 316. DOI: 10.1002/ggge.20060
- [58] XIE Yuanyun, YUAN Fang, ZHAN Tao, et al. Geochemical and isotopic characteristics of sediments for the Hulun Buir Sandy Land, northeast China: Implication for weathering, recycling and dust provenance [J]. *Catena*, 2018, **160**: 170 – 184. DOI: 10.1016/j.catena.2017.09.008
- [59] CONDIE K C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales [J]. *Chemical Geology*, 1993, **104**: 1 – 37. DOI: 10.1016/0009-2541(93)90140-E
- [60] 董策, 周建波. 内蒙古东北部中二叠统哲斯组砂岩地球化学特征分析及物源区示踪[J]. *岩石矿物学杂志*, 2012, **31**(5): 663 – 673. [DONG Ce, ZHOU Jianbo. Geochemical characteristics analysis and provenance tracing of sandstone in Middle Permian Zhesi Formation, northeast Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2012, **31**(5): 663 – 673]
- [61] CULLERS R L. The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian – Permian age, Colorado, USA: Implications for provenance and metamorphic studies [J]. *Lithos*, 2000, **51**(3): 181 – 203. DOI: 10.1016/S0024-4937(99)00063-8
- [62] FLOYD P A, LEVERIDGE B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones [J]. *Journal of the Geological Society*, 1987, **144**(4): 531 – 542. DOI: 10.1144/gsjgs.144.4.0531
- [63] ROSER B P, KORSCH R J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suite determined using discriminant function analysis of major element data [J]. *Chemical Geology*, 1988, **67**: 119 – 139. DOI: 10.1016/0009-2541(88)90010-1
- [64] 甄甄, 陈树旺, 郑月娟, 等. 内蒙古阿鲁科尔沁旗陶海营子剖面林西组地球化学特征及其对物源—构造背景的制约[J]. *中国地质*, 2018, **45**(5): 1011 – 1022. [ZHEN Zhen, CHEN Shuwang, ZHENG Yuejuan, et al. Geochemical characteristics of Linxi Formation along Taohaiyingzi section in Ar Horqin Banner, Inner Mongolia, and the constraint on the provenances and the tectonic settings [J]. *Geology in China*, 2018, **45**(5): 1011 – 1022] DOI: 10.12029/gc20180509
- [65] BHATIA M R, CROOK K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1986, **92**(2): 181 – 193. DOI: 10.1007/BF00375292
- [66] 王旭影, 姜在兴. 苏北盆地古近系阜三段物源特征及其形成的构造背景分析[J]. *地学前缘*, 2021, **28**(2): 376 – 390. [WANG Xuying, JIANG Zaixing. Provenance characteristics and tectonic setting analysis of the 3rd Member of the Paleogene Funing Formation, Subei Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, **28**(2): 376 – 390] DOI: 10.13745/j.esf.sf.2020.6.31
- [67] 代辉, 钟摇, 熊璨, 等. 重庆云阳地区中侏罗世新田沟组底部细粒碎屑岩地球化学特征及意义[J]. *矿物岩石*, 2021, **41**(1): 32 – 43. [DAI Hui, ZHONG Yao, XIONG Can, et al. The geochemistry characteristics and significance of fine-grained clastic rocks from the Xintiangou Formation in Yunyang county, Chongqing [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2021, **41**(1): 32 – 43] DOI: 10.19719/j.cnki.1001-6872.2021.01.04

Stratigraphic Characteristics of the Baitushan Formation in Longjiang County, Eastern Foothills of the Great Xing'an Range, China: Chemical Weathering, Sediment Cycling, Source-Sink System and Sedimentary Environment

SUN Yang^{1a}, XIE Yuanyun^{1a,1b*}, CHI Yunping^{1a,1b}, KANG Chunguo², WU Peng^{1a}

(1. Harbin Normal University a. College of geographic science; b. Heilongjiang Province

Key Laboratory of Geographical Environment Monitoring and Spatial Information Service in Cold Regions, Harbin 150025, China;

2. Geography Department, Harbin Institute, Harbin 150086, China)

Abstract: The Baitushan Formation, located at Longjiang county in the eastern foothills of the Great Xing'an Range of China, is a typical lower limit of Quaternary stratigraphy. Although lithological characteristics of the stratigraphy had been investigated, its comprehensive properties remain unclear, and its genesis and depositional environment had kept highly controversial. In this study, 200 gravel samples from the Baitushan Formation stratigraphy were collected for sedimentological measurement. Heavy minerals and geochemical composition (major, trace and rare earth elements) were tested for the Baitushan Formation sediments to interpret their evolution, including chemical weathering, provenance, sedimentary environment and tectonic setting. The results include: (1) The gravel accumulation of the Baitushan Formation were characterized by poorly sorting and roundness, and moderate degree of weathering. The lithology of gravels was mainly composed of rhyolite (30.65%), vein quartz (21.51%), tuff (20.97%), terrigenous clastic rock (15.59%) and granite (11.29%). (2) The heavy mineral composition was mainly ilmenite (32.28%), leucoxene (29.05%), epidote (19.77%) and zircon (6.21%). Additionally, anatase, hematite + limonite, magnetite and sphene were also found in small quantities. (3) Sedimentology, mineralogy, geochemistry and geomorphic evidence indicated that the Baitushan Formation sediments were alluvial-diluvial sediments from felsic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, and had undergone the first sedimentary cycling, and moderate chemical weathering. (4) The discriminant diagram showed that the tectonic setting of the Baitushan Formation sediments was passive continental margin. This study is of great significance to the stratigraphic division and correlation and the reconstruction of tectonic, geomorphological, climatic and drainage evolution of the Early Pleistocene in the eastern foothills of the Great Xing'an Range.

Key words: geochemistry; sedimentology; heavy minerals; chemical weathering; sedimentary environment; Baitushan Formation; the Great Xing'an Range; Longjiang county