

河流过程对小型集水区沉积物地球化学与重矿物组成的影响 ——以巴兰河为例

赵慧莹¹, 谢远云^{1,2}, 迟云平^{1,2}, 康春国³, 吴鹏¹, 孙磊¹, 魏振宇¹

1. 哈尔滨师范大学地理科学学院, 哈尔滨 150025

2. 哈尔滨师范大学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

3. 哈尔滨学院地理系, 哈尔滨 150086

摘要 【目的】河流沉积物记录了丰富的源区信息, 对于探究流域源区风化、搬运—沉积循环及母岩成分具有重要意义。与整合了不同风化机制并包含复杂岩石类型的大型流域不同, 小型河流具有相似的气候和岩性背景, 对研究沉积物物质组成有重要研究价值。【方法】为了探究河流过程对沉积物物质组成的影响, 将从巴兰河上游到下游的边滩上获取的8个样品进行分粒级处理($<63\ \mu\text{m}$ 、 $63\sim 125\ \mu\text{m}$ 、 $125\sim 250\ \mu\text{m}$), 将小于 $63\ \mu\text{m}$ 的样品进行地球化学测试(常量、微量、稀土和Sr-Nd同位素), $63\sim 125\ \mu\text{m}$ 和 $125\sim 250\ \mu\text{m}$ 的样品进行重矿物测试。【结果】巴兰河沉积物经历了较低的化学风化作用、成熟度较低, 处于初次循环沉积, 物源主要来源于长英质母岩。物源指标(La/Sc、Co/Th、Cr/Th、Th/Sc)和Sr-Nd同位素组成总体变化较小, 能够代表巴兰河总体流域特征。【结论】巴兰河样品呈现出一致的化学风化程度、成熟度、再循环特征、母岩特征, 这说明河流过程并没有对巴兰河沉积物的地球化学组成造成明显影响。重矿物经过河流的搬运后稀释混合, 不同河段及不同粒级组分重矿物明显呈现不同的含量组成, 表明短距离的搬运很难使重矿物均匀分配到不同粒级组分。因此, 在进行河流源—汇系统研究时, 少数的样品很难代表整个流域的重矿物组成, 即便是在小型河流中。另外, 强调了Sr-Nd同位素与不活动元素比值结合可以有效进行河流物源示踪。

关键词 巴兰河; 河流过程; 地球化学组成; 重矿物; Sr-Nd同位素

第一作者简介 赵慧莹, 女, 1998年出生, 硕士研究生, 第四纪地质与环境变化, E-mail: 18746917868@163.com

通信作者 谢远云, 男, 教授, E-mail: xyy0451@hrbnu.edu.cn

中图分类号 P595 **文献标志码** A

0 引言

河流作为陆源碎屑物向沉积区搬运的主要通道, 是陆源物质迁移的重要途径。河流沉积物记录了丰富的地形、古气候、古环境以及构造活动和地壳演化等多种信息, 能很好地反映流域物质组成, 是沉积物源—汇系统研究的重要载体^[1-4]。然而沉积物在搬运和沉积过程中常发生分选作用, 具有相同沉降速度的颗粒沉积在一起。沉积物中的矿物因其粒度、形状和密度的差异而被分选, 这在很大程度上导致沉积物矿物组成和化学成分发生了改变^[5-7]。因此, 对河流沉积物的地球化学元素和重矿物组成进行研究, 对了解河流地质过程具有重要意义。

大部分对河流物源分析的工作都是针对流域面积广阔、支流水系发达、环境较为复杂的大河流域, 这些大河甚至贯穿多个地貌单元和构造带。例如, 长江作为链接亚洲季风系统以及青藏高原构造运动的纽带, 流经了广阔的大陆克拉通区域, 其沉积物不仅记录了沉积区域的环境信息, 还记录了流域多个地貌体系和构造单元的演化信息^[8-11]; 黄河的形成演化则对理解东亚地貌格局发育历史和构造环境变化至关重要^[12-14]。然而, 与整合了不同风化机制并包含复杂岩石类型的大型河流流域不同, 小型集水区具有相似的气候和岩性背景, 这使研究的复杂性大大降低^[6]。因此, 这些小河可被视为研究河流过程对沉积物物质组成影响的天然的沉积学实验室。

收稿日期: 2022-09-26; 修回日期: 2023-02-01; 录用日期: 2023-03-27; 网络出版日期: 2023-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(42171006, 41871013) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42171006, 41871013]

松花江作为中国七大水系之一,是东北地区最重要的河流。20世纪70—90年代一些学者对其开展了深入研究^[15],近年来学者对松花江进行了重矿物分析来探讨松花江的水系演化模式^[7,16-17]。巴兰河作为松花江水系的支流,流域面积较小,长度较短,具有相对单一的气候和岩性背景,为探究小型流域的河流过程提供了一个很好的机会。目前对于巴兰河的研究仅局限于与松花江支流的对比分析^[17-19],针对巴兰河这类小型集水区的系统研究相对较少。本文以巴兰河为研究对象,阐述其地球化学特征(常量、微量、稀土和Sr-Nd同位素)以及重矿物特征,揭示河流过程对小型集水区沉积物物质组成产生的影响,完善了松花江水系的研究,也为今后探索其他小河流域奠定基础。

1 研究区概况

松花江水系位于松嫩平原东北部,是中国七大河流之一,主要流经黑龙江、吉林两省,流域面积为 $55.68 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。松花江有南北两源,北源为发源于大兴安岭支脉伊勒呼里山的嫩江,南源为发源于吉林省长白山天池的第二松花江,两江于三岔河汇合后称松花江^[20]。根据松花江的河道特性以及流域地形特征,可将其分为上、中、下三段。上游为松原市至

哈尔滨市,全长240 km;中游为哈尔滨市至佳木斯市,全长432 km;下游为佳木斯市至同江市,全长267 km^[17,20]。根据物源对松花江水系的贡献不同,可以划分为依兰方向河流和松原方向河流。依兰方向河流物源主要来自小兴安岭和张广才岭,松原方向河流物源主要来自大兴安岭和长白山西侧^[17]。

巴兰河是松花江左岸支流(图1),位于哈尔滨市东北部依兰县($45^\circ 50' 40'' \sim 46^\circ 39' 20'' \text{ N}$, $129^\circ 11' 50'' \sim 130^\circ 11' 40'' \text{ E}$)内。全长108 km,河宽20~60 m,水深0.3~1.0 m,流域总面积为2 075 km^2 ,每年11月中旬至次年4月上旬为结冰期。巴兰河发源于小兴安岭余脉五华顶子北侧,流经依兰县并注入松花江。依兰县河网密布,河流较多,年平均气温 $3.1^\circ \text{C} \sim 3.6^\circ \text{C}$,松花江以北地区较以南地区低 0.5°C 。

2 材料与方法

在巴兰河的边滩,从上游到下游采集8个样品(图1),依次命名为BLH-8~BLH-1。采样位置尽量避开城市和可能污染源,剥去表面10 cm进行取样。样品在室内风干后,使用200目($63 \mu\text{m}$)标准分样筛,获得小于 $63 \mu\text{m}$ 的粒度组用于地球化学分析。使用荷兰帕纳(PANalytica)XRF(X-ray fluorescence)光谱仪进行常量元素测试,测量误差控制在3%以内。

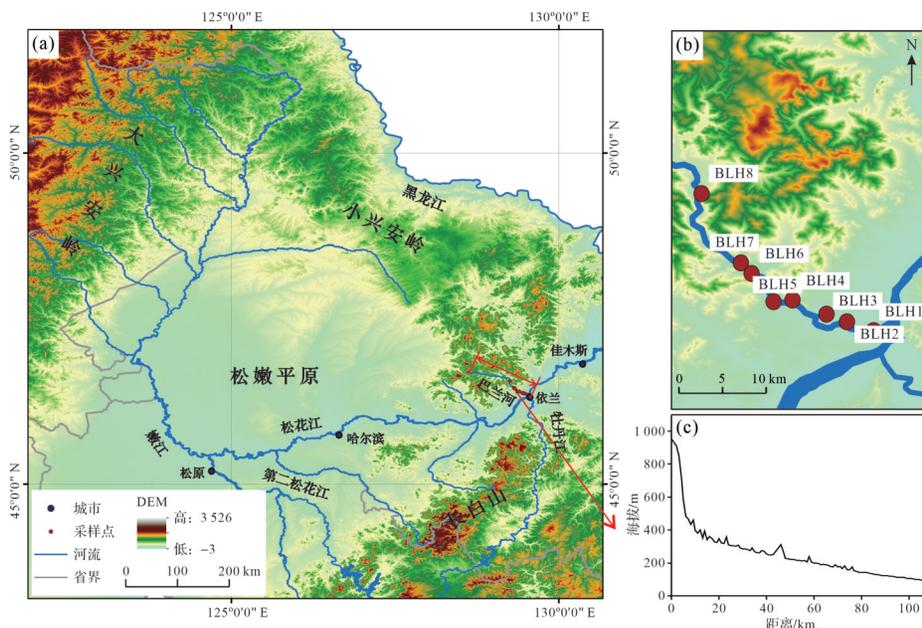


图1 研究区概况图

(a)研究区DEM图;(b)巴兰河采样位置图;(c)河流剖面示意图

Fig.1 Overview map of the study area

(a) DEM map of the study area; (b) sampling locations along the Balan River; (c) schematic of river profile

使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行微量、稀土元素的测试。为了保证实验结果的精准度,测量过程中添加国际标样、空白样品及重复样进行分析^[21],测试准确度、精度和不确定度(相对偏差)均小于2%^[22-23]。采用标准离子交换方法进行Sr和Nd的分离,并分别使用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.119\ 4$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.721\ 9$,将Sr和Nd同位素比值标准化以校正质量分数。通过定期使用国际标准样品NBS 987和JMC进行仪器的准确度测试,Sr、Nd同位素测试平均值分别为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710\ 250\pm 7(2\sigma)$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512\ 109\pm 3(2\sigma)$ 。 $\varepsilon\text{Nd}(0)$ 值(Nd同位素组成)采用球粒陨石均一源(CHUR)现代值 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512\ 638$ 计算。整个流程的化学分析空白为: Sr<1 ng, Nd<50 pg。元素地球化学测试和Sr-Nd同位素的测定在兰州大学进行。

此外,这8个样品被干筛分成63~125 μm 和125~250 μm 两个粒度组用于重矿物分析。首先将重矿物样品烘干并称重后,利用三溴甲烷(密度为2.89 g/cm^3)分离重矿物样品,用酒精反复冲洗分离得到的样品,烘干后(60 $^{\circ}\text{C}$ 恒温)再次称重^[21,24-25],最后用薄纸包住永久磁铁反复磁吸,得到重矿物的无磁、电磁、强磁部分,将分离出来的重矿物部分放在双目镜下进行鉴定,每个重矿物样品鉴定颗粒数在900粒以上^[23,26]。重矿物鉴定在廊坊诚信地质公司进行。

3 结果

3.1 地球化学元素特征

巴兰河沉积物的化学成分以 SiO_2 (69.40%)、 Al_2O_3 (14.64%)和 Fe_2O_3 (3.97%)为主,相较于UCC(上地壳),MnO和 TiO_2 轻微富集,MgO、CaO和 P_2O_5 呈现

亏损状态, Fe_2O_3 和 Na_2O 呈现出较大可变性, SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 与UCC含量相似(图2)。CaO的含量在BLH-8样品以及BLH-6样品出现高值; Na_2O 在BLH-7样品以及BLH-3样品出现高值; Fe_2O_3 在BLH-2样品出现高值;其余元素样品间差异较小。

巴兰河沉积物微量元素与UCC相比(图2),微量元素中Zr、Hf呈现富集状态,Y、Th、U部分富集,其余元素全部亏损。BLH-2样品的Sc、V、Co、Ni、Zn、Nb值显著大于其他样品。Zr在BLH-1样品和BLH-2样品的含量显著高于其他样品。Rb在BLH-7样品含量高于其他样品。Y、Th、U、Hf在BLH-2样品、BLH-7样品中含量高于其他样品,其余微量元素差异不明显。

巴兰河沉积物稀土总量($\sum\text{REE}$)为 101.15×10^{-6} ,低于UCC(平均值 146.37×10^{-6})和后太古宙页岩标准值(PAAS: 184.77×10^{-6})^[27];轻稀土(LREE)富集,平均值为 88.45×10^{-6} ;重稀土(HREE)丰度较低,平均值为 12.70×10^{-6} (图2)。轻稀土与重稀土比值为5.15~8.78,平均为6.97; $\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.46\times 10^{-6}$, $\text{Ce}/\text{Ce}^*=0.93\times 10^{-6}$,表明巴兰河存在Eu、Ce负异常。 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值介于3.26~3.78,平均为3.52,表明轻稀土间分馏程度较强; $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值介于0.87~1.39,平均为1.19,表明重稀土间分馏程度较弱; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值介于3.74~8.19,平均为6.16,稀土配分曲线为右倾型,表明轻稀土富集,重稀土亏损。就稀土元素而言,BLH-7样品、BLH-6样品与BLH-2样品的值明显高于其他样品。

巴兰河的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值比较稳定,介于0.705 130~0.714 083,平均为0.711 931,与松花江依兰方向支流样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值相吻合^[19]。 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值介于0.512 335~0.512 402,平均为0.512 367。 $\varepsilon\text{Nd}(0)$ 值介于-5.914~-4.604,平均为-5.277(表1)。

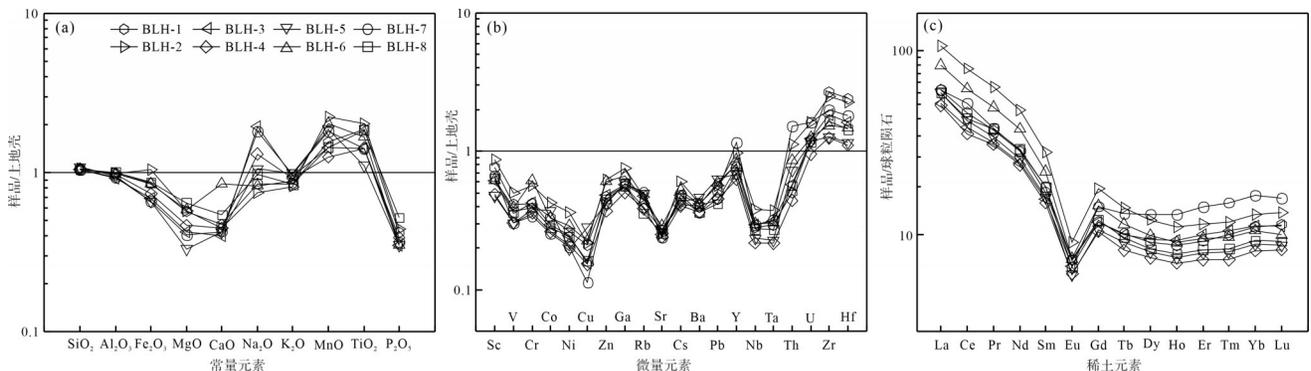


图2 巴兰河沉积物元素标准化模式图

Fig.2 Normalized patterns for elements in Balan River sediments

表1 巴兰河沉积物Sr-Nd同位素组成
Table 1 Sr-Nd isotopic compositions
in Balan River sediments

样品号	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$
BLH-1	0.712 353	0.512 372	-5.20
BLH-2	0.705 131	0.512 348	-5.66
BLH-3	0.713 376	0.512 335	-5.91
BLH-4	0.712 411	0.512 349	-5.63
BLH-5	0.713 433	0.512 397	-4.70
BLH-6	0.712 811	0.512 378	-5.08
BLH-7	0.714 083	0.512 402	-4.60
BLH-8	0.711 850	0.512 359	-5.44

注: $\epsilon_{\text{Nd}}(0) = [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{sample}} / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1] \times 10\ 000$;
 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512\ 638$ 。

3.2 重矿物组合特征

利用沉积物的重矿物类型和组成来判断源区是探讨河流过程的重要手段^[25,28]。在河流沉积物中,由于重矿物具有化学性质稳定、耐磨蚀等特性,因此在风化、搬运以及成岩过程中受到的影响相对较弱,能

够较多地保留母岩信息^[29]。巴兰河重矿物分为两个粒度组分(图3):63~125 μm 、125~250 μm ,检查出的重矿物有16种,其中菱铁矿仅在个别样品中出现,为偶见矿物。

巴兰河(63~125 μm)的重矿物以角闪石(22.12%~55.06%)、铁磁性矿物(6.17%~22.16%)和榍石(10.09%~18.37%)为主,占72.96%;钛铁矿(3.60%~18.32%)、绿帘石(1.72%~11.30%)、锆石(0.45%~5.01%)、石榴子石(0.33%~4.27%)、赤褐铁矿(1.33%~3.96%)次之,占20.57%;其他矿物占6.47%。在125~250 μm 组分中(图3),巴兰河的重矿物以角闪石(36.21%~53.39%)、榍石(12.04%~35.97%)和绿帘石(2.68%~26.21%)为主,占75.96%;钛铁矿(0.21%~14.25%)、铁磁性矿物(1.08%~17.50%)、赤褐铁矿(0.27%~3.52%)、石榴子石(0.48%~2.62%)、白钛石(0.10%~4.83%)次之,占16.79%;其他重矿物均不足1%。

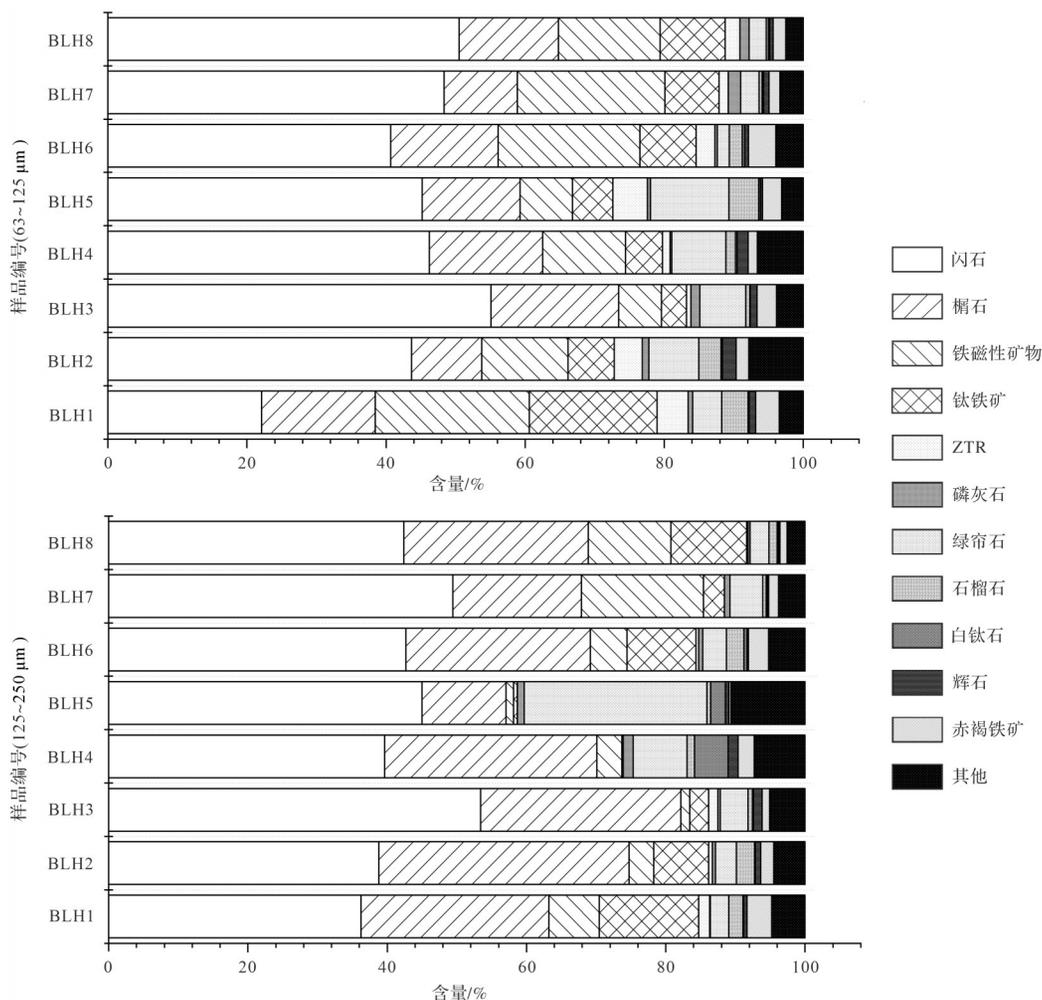


图3 巴兰河沉积物的重矿物组成

Fig.3 Heavy mineral composition in Balan River sediments

4 讨论

沉积物的地球化学组成主要受物源区母岩性质和构造背景的影响,但是河流沉积物在搬运过程中还会受到化学风化、搬运方式和介质、迁移距离、分选作用、再循环等影响,给利用沉积物的地球化学特征进行物源分析及成岩构造背景判别带来多解性与复杂性^[50]。为了评估小型河流过程是否会对来自同一物源区的沉积物地球化学与重矿物组成造成影响,为此我们从沉积物的化学风化特征、成熟度、再循环特征以及母岩特征来探究河流过程对地球化学组成的影响,结合河流的分选作用探究河流过程对沉积重矿物组成的影响。

4.1 沉积物化学风化特征与成熟度

河流沉积物的化学组成可以敏感地反映流域化学风化程度,而沉积物风化指数不仅会受到风化强度的影响,还会受到沉积物侵蚀、搬运和沉积过程中水力过程的干扰^[5,31-32],这些风化指数不仅记录了沉积物搬运和沉积过程中的水力分选效应,还反映了流域完整的风化历史^[6,33]。

Nesbitt *et al.*^[34]为了评价沉积物的风化程度,提出了化学蚀变指数(CIA):

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

式中:各氧化物均为氧化物分子摩尔数,其中CaO*为不包含碳酸盐和磷酸盐内CaO的硅酸盐矿物中的摩尔含量。

CIA的值越大,沉积物的化学风化程度越强,CIA介于50~60代表初等程度的化学风化,CIA介于60~80代表中等程度的化学风化,CIA介于80~100代表强烈的化学风化程度。巴兰河沉积物的CIA值介于42.77~58.19(图4),平均为51.16,说明巴兰河经历了程度较弱的化学风化。

WIP是Parker^[35]最先提出的评价硅酸盐岩风化强度的指标,通过计算碱金属和碱土金属元素在风化产物中所占的比例来判断化学风化程度。

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

WIP值越小,风化作用越强^[33,36-37]。巴兰河的WIP值介于54.00~99.94(图5),平均为71.84,反映了巴兰河风化程度较弱。

在A-CN-K图中(图4),根据元素的迁移顺序,风

化作用可分为以下三个阶段:早期斜长石风化,表现为风化趋势线平行于A-CN线指向A;中期钾长石和伊利石风化,斜长石消失,表现为风化趋势线平行于A-K线;晚期残余风化产物(高岭石、三水铝石以及绿泥石),表现为产物集中分布在A点^[33,38]。巴兰河样品分布在斜长石与钾长石附近,风化趋势线平行于A-CN线指向A点,样品点全部低于PAAS,说明样品经历了较低的化学风化作用。

氧化物比值可以用来表征样品之间的差异,黏土矿物和非黏土硅酸盐矿物的特点是氧化铝的比例差别很大。Cox *et al.*^[37]定义成分可变性指数ICV(Index of Compositional Variability),用于测量岩石或矿物中氧化铝相对于其他主要阳离子的丰度。ICV也可用于泥岩作为成分成熟度的测量,成分成熟的泥岩缺乏非钙硅酸盐或以矿物(如kandite族的矿物)为主,将具有低值。成分不成熟的泥岩往往出现在构造活跃的环境中,将具有高值,这里的Fe₂O₃为总铁含量^[33,37,39-40]。

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

成分不成熟的沉积物具有高ICV值(>1),而成分成熟的沉积物具有低ICV值(<1)。巴兰河的ICV均值为1.08,说明样品具有高的ICV值,沉积物成熟度低。

SiO₂/Al₂O₃、Al₂O₃/Na₂O和K₂O/Na₂O比值亦是判断沉积物成熟度的指标,高比值(分别大于6、大于5和大于1)表明沉积物成熟度高^[37]。较低的K₂O/Na₂O比值表明,源区主要是演化程度较低的富含斜长石的岩石^[41-42]。此外,碎屑沉积物中的K₂O/Al₂O₃比值可以指示碱性长石相对于铝硅酸盐的丰度。K₂O/Al₂O₃大于0.5表明有大量的碱性长石,而小于0.5表明碱性长石相对于铝硅酸盐有所减少^[37]。巴兰河沉积物SiO₂/Al₂O₃值介于4.51~5.01,平均为4.75;Al₂O₃/Na₂O值介于1.83~5.10,平均为3.56;K₂O/Na₂O值介于0.42~0.95,平均为0.73;三者的低比值都表明巴兰河沉积物的成分成熟度较低。

综合巴兰河沉积物的CIA、WIP、A-CN-K图、ICV以及SiO₂/Al₂O₃、Al₂O₃/Na₂O和K₂O/Na₂O比值,表明巴兰河沉积物经历了较低的化学风化作用,成熟度较低。从巴兰河沉积物的化学风化特征以及成熟度的指标上看,这8个样品并没有明显变化,表明河流过程对巴兰河沉积物本身的化学风化特征以及成熟度影响较小。

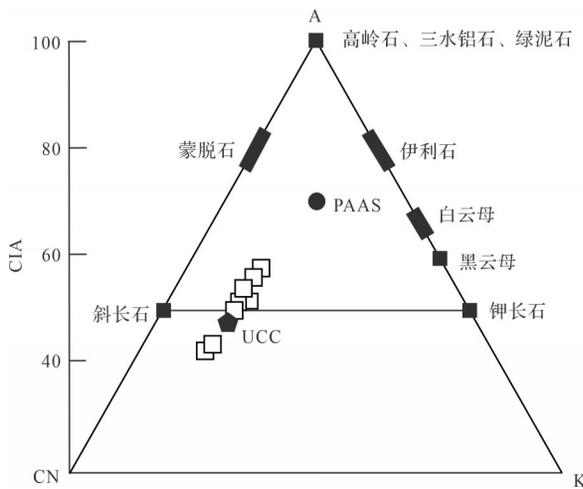


图4 巴兰河沉积物的A-CN-K三角图解

Fig.4 A-CN-K ternary diagram for Balan River sediments

4.2 沉积物再循环特征

在化学风化水平高的地区,初次循环下的沉积物CIA/WIP值一般小于10,而多次循环下的沉积物CIA/WIP比值一般大于10,甚至可以达到100^[5]。巴兰河的CIA/WIP值介于0.43~1.08(图5),平均为0.76,所有值均小于10,远低于初次与多次循环的临界点(CIA/WIP=10),说明巴兰河样品处于初次循环。

Ohta^[43]提出, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值在分选过程中对石英、钠长石和伊利石的分馏非常敏感。 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 二元图解(图5)可通过沉积分选作用对沉积物化学组成的影响来判断沉积物的来源及沉积再循环特征。该二元图解可被用来度量区分首次循环和再循环沉积:直接来源于岩浆岩源区的沉积物(初次循环)的化学组成形成一条垂直的线性趋势线;而直接来源于沉积岩源区的沉积物(再循

环沉积)的化学组成会形成一条水平的线性趋势线。从巴兰河样品的二元图解来看,样品分布呈现垂直状态,说明巴兰河样品处于初次循环。

综合巴兰河沉积物的CIA/WIP比值、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 二元图解,巴兰河沉积物的再循环特征指标值变化较小,均指示为初次循环沉积,河流过程对巴兰河沉积物的再循环特征影响较小。

4.3 母岩性质

巴兰河作为松花江的支流,对于它的母岩性质研究仅局限于从重矿物方向阐述,针对其地球化学方面的研究尚未涉及。由巴兰河的地理位置可知其为依兰方向河流,物源主要来自小兴安岭东南侧^[7,17,44]。而小兴安岭的岩性以花岗岩、花岗闪长岩和变质岩为特征^[44]。巴兰河作为一条气候与岩性背景相对单一的小型河流,8个样品能否准确判别其母岩类型,能否对应实际的地质情况,河流过程是否会改变沉积物携带的母岩性质,其结果能为未来探究小型河流源区时提供一定的依据。

不活动元素及其比值在长英质和铁镁质源岩中存在显著差异,常被用来示踪物源^[23,45-47]。相容元素和不相容元素在母岩中的相对比值可以确定母岩性质:过渡元素(Ni、Sc、V、Co、Cr)等富集在基性母岩(铁镁质)中^[46];而高场强元素(Y、Zr、Hf、Nb、Ta、Th、U)为不相容元素,主要富集在酸性母岩(长英质)中^[48]。因此,元素比率和基于这些元素的图解对于区分沉积物来源是非常有效的。在Co/Th-La/Sc图解中(图6a)^[49],样品投点在长英质火山岩附近,且样品的Co/Th小于1;在Cr/Th-Th/Sc二元图解中(图6b),样品的Cr/Th值和Th/Sc值,分别介于0.73~2.74(平均为

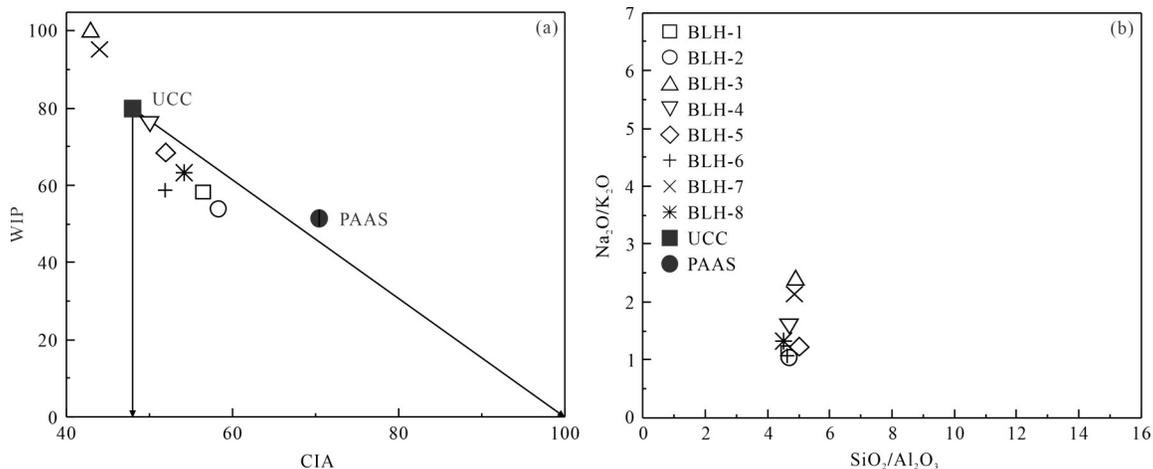


图5 巴兰河沉积物沉积循环判别图解

Fig.5 Discriminant diagrams for sediment recycling in Balan River sediments

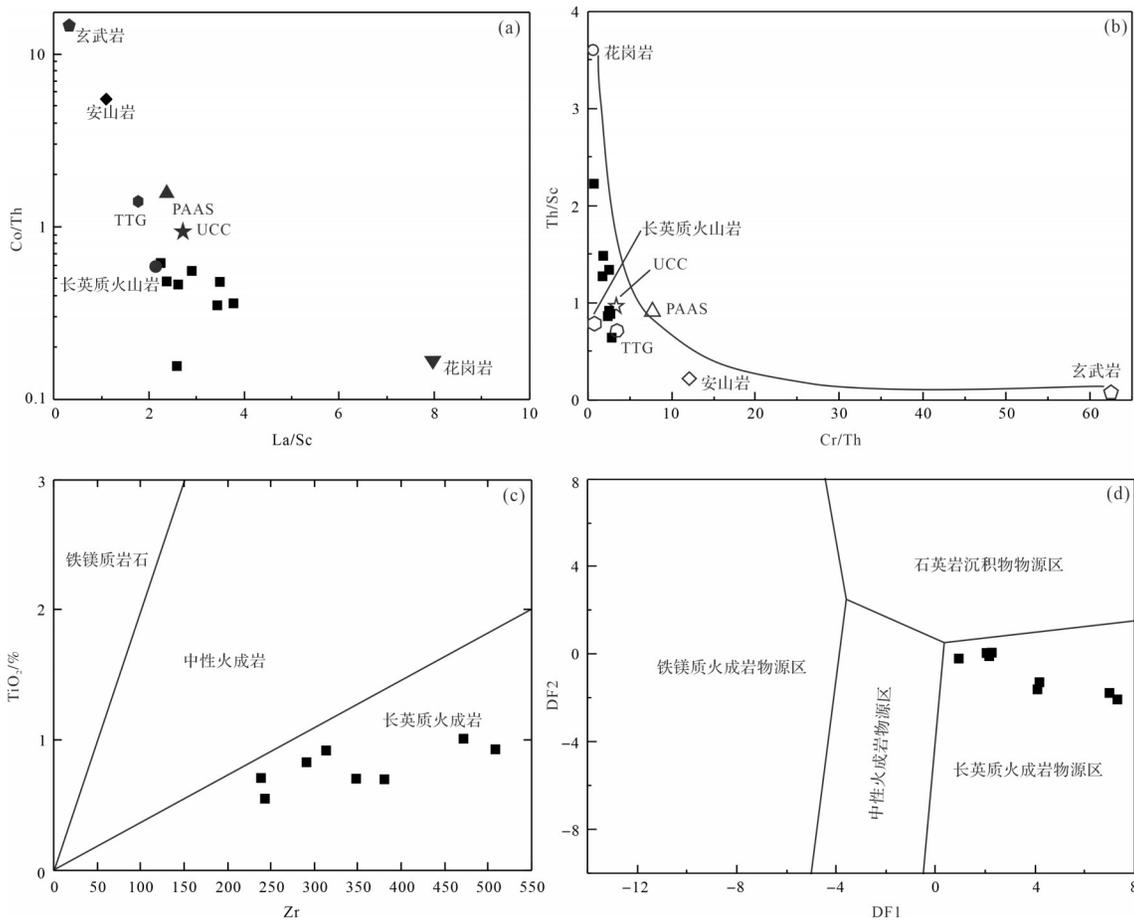


图6 巴兰河沉积物母岩性质判别图

(a) Co/Th-La/Sc 图解; (b) Cr/Th-Th/Sc 图解; (c) TiO₂-Zr 图解; (d) DF1-DF2 图解

$$DF1 = 30.638 \times TiO_2/Al_2O_3 - 12.541 \times Fe_2O_3/Al_2O_3 + 7.329 \times MgO/Al_2O_3 + 12.031 \times Na_2O/Al_2O_3 + 35.420 \times K_2O/Al_2O_3 - 6.382$$

$$DF2 = 56.500 \times TiO_2/Al_2O_3 - 10.879 \times Fe_2O_3/Al_2O_3 + 30.875 \times MgO/Al_2O_3 - 5.404 \times Na_2O/Al_2O_3 + 11.112 \times K_2O/Al_2O_3 - 3.890$$

Fig.6 Discriminant diagrams of source-rock nature for Balan River sediments

2.06)、0.64~2.22(平均为 1.20),从图上可看出巴兰河沉积物主要在长英质火山岩附近。

在 TiO₂-Zr 双变量图中(图 6c)^[50],样品点全部分布在长英质火成岩区域,表明所研究的巴兰河沉积物物源岩具有长英质火成岩性质。Roser *et al.*^[51]提出了一个用 7 种常量元素组成两组判别函数(DF1、DF2)用来确定 4 种不同来源成分物源鉴别图(图 6d),在此图中巴兰河沉积物全部分布在长英质火成岩物源区。

在 Co/Th-La/Sc、Cr/Th-Th/Sc、TiO₂-Zr 二元图图解以及判别函数图上,样品几乎全部落入长英质火成岩源区范围内,指示巴兰河沉积物物源主要来源于长英质火成岩。将巴兰河沉积物样品的母岩特征与小兴安岭的岩性^[7]进行对比,其母岩特征与现今物源区出露的岩石特征基本一致。8 个样品足以判别其母岩类型,河流过程并没有改变巴兰河沉积物携带

的母岩性质,能够很好地反映物源。

4.4 河流地质过程对地球化学组成的影响

Sr-Nd 同位素比值在示踪沉积物的物源和搬运方面具有巨大的潜力,Sr 同位素分馏对风化条件的变化和迁移过程的差异很敏感,一般认为会受到化学风化和粒度效应的影响。而 Nd 同位素比值仅与源岩的性质有关,基本不受粒度分异和化学风化的影响。因此,Sr-Nd 同位素比值变化幅度的大小能够作为河流过程是否影响沉积物地球化学组成的判断依据之一^[52]。

⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值被广泛用于地球化学示踪^[24,53],⁸⁷Sr 单方向增长并以 ⁸⁶Sr 作为比较基础,根据等时线外推或含 Sr 矿物测定得到地质体形成时的初始 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 来示踪其物质来源^[54]。Nd 同位素比较稳定,不易受到风化、搬运、堆积以及后期成岩影响,能真实反映母岩特征。Nd 同位素组成的差异是由于不

同环境中其放射性母体含量的差异长期积累或演化造成的。 ϵNd 值指Nd同位素的初始值相对于球粒陨石质地幔演化值的偏差^[54]。

从不同样品之间的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值差异来看(表1),只有样品之间的差异大于0.000 050时,才被认为不同样品之间的绝对Sr同位素差异具有地质意义。也有不同的观点认为,如果样品之间的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的差异在0.001 500以内,则Sr同位素组成是相同的^[52,55-56]。巴兰河的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值从0.705 160 614到0.714 082 914,最大差值为0.008 952 299,最小差值为0.000 400 076。BLH-2样品与其他样品的Sr具有明显差异。相比之下,BLH-8样品和BLH-7样品只能与其余样品发生部分差异,其余样品间差异不大,说明其余样品之间不具有地质意义上的差异。总体来说,Sr同位素仅在个别样品间产生差异,大部分样品之间不具有地质意义上的差异。

从Nd同位素的变化范围来看(表1), $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值的变化不大,最低值为4.6,最高值为5.9。对于 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 之间 $\epsilon\text{Nd}(0)$ 值差异来看,目前认为只有当样品间 $\epsilon\text{Nd}(0)$ 值的差异大于 1ϵ 单位时,Nd同位素组成才会发生本质变化或出现同位素异常^[57],这种Nd同位素变化才是由地质作用而不是实验误差触发的^[53]。从上游到下游的样品中,样品之间 $\epsilon\text{Nd}(0)$ 最大差值为 1.31ϵ ,最小差值为 0.03ϵ ,仅有两个样品超过 1ϵ 。样品间 $\epsilon\text{Nd}(0)$ 差值较小,变化不明显。所以可以认为整条巴兰河的Nd同位素很稳定,Nd同位素不易受到风化搬运堆积以及后期成岩影响,能真实反映流域母岩特征,8个样品可以代表巴兰河的Nd同位素特征。

河流过程对地球化学组成的影响体现在多个方面,包括化学风化特征、再循环特征以及母岩性质特征。在巴兰河样品中,常量元素、微量元素变化不明显,不活动元素比值La/Sc、Co/Th、Cr/Th、Th/Sc(图6)和Sr-Nd同位素(表1)总体上变化较小,能够很好地示踪物源。样品呈现出一致的化学风化程度、成熟度、再循环特征、母岩特征,这说明河流过程对地球化学组成的影响较小。虽然物源示踪指标 ΣLREE 、 ΣHREE 、 ΣREE 、 LREE/HREE 以及化学风化指标CIA、CIA/WIP在BLH-2样品出现最高值,但附近的BLH-1、BLH-3号样品却没有出现BLH-2样品的高值现象,推测可能BLH-2样品的稀土元素与风化指标的高值受到了人为因素的影响。

巴兰河的8个样品地球化学组成变化不大,虽然BLH-2样品的稀土元素与风化指标出现高值,但并不影响最后的物源判别,单一样品能够代表巴兰河总体的地球化学特征,但在选择样品数量时也要考虑人为因素的影响。对于流域面积较小、气候相似、岩性背景单一的巴兰河而言,河流过程没有对巴兰河沉积物的地球化学组成造成明显影响,可以准确恢复源区母岩性质。

4.5 河流地质过程对重矿物组成的影响

从巴兰河上游到下游,河床宽度越来越宽,河床沙出现的规模也越来越大,河床沙颗粒的磨圆度也越来越好。在63~125 μm 组分中,角闪石、铁磁性矿物、榍石、钛铁矿富集,重矿物组合为角闪石+铁磁性矿物+榍石+钛铁矿+绿帘石+锆石+石榴子石,金红石、电气石、菱铁矿仅在个别样品出现。在125~250 μm 组分中,角闪石、榍石、绿帘石、钛铁矿富集,重矿物组合为角闪石+榍石+绿帘石+钛铁矿+铁磁性矿物+赤褐铁矿+石榴子石,锆石、锐钛矿、金红石、电气石、菱铁矿、磁铁矿仅在个别样品中出现。不同粒径组分重矿物组成不同,对比两个粒度组分的重矿物含量可以看出,榍石、石榴子石、绿帘石、钛铁矿、磁铁矿存在明显差别,但两粒级组分的重矿物组合类似。

同一粒度组分不同河段的重矿物含量则波动变化(图3),呈现出明显差异,特别是金红石、电气石只在下游稳定出现,菱铁矿仅在个别样品(BLH-2)出现。在物源相同的条件下,巴兰河样品表现出不同的矿物组成。同一粒径不同河段出现明显的重矿物缺失(金红石、电气石),同一河段不同粒径也出现重矿物缺失的现象(锆石、金红石、锐钛矿、磁铁矿)。当某些重矿物只局限分布在某一样品、某一粒度组分中,单一窗口或者过少样品都很难准确得到源区母岩重矿物组成。因此,为了准确获得源区母岩信息,样品的数量非常重要。对于巴兰河的8个重矿物样品而言,单一样品或者过少样品都很难代表整条河流的重矿物特征,河流在搬运过程中由于水动力分选作用对重矿物组成造成较大影响。那么,稳定重矿物比值能否消除重矿物粒度效应的影响,这对于进一步探讨小型流域河流过程对重矿物的影响提供帮助。

重矿物组合在河流搬运以及沉积过程中会受到诸如机械磨损、化学溶蚀和水动力分选等因素的影

响,导致物源判断准确性不足^[17,58]。在相似的水动力条件下,稳定重矿物比值能够在物源示踪过程中最大限度地消除矿物的粒度效应的影响^[17],较好地反映沉积物的成熟度并反映物源特征^[58-59],这些比值被称为重矿物特征指数。如:ZTR指数、ATi指数、GZi指数。公式如下:

$$\text{ZTR指数} = \text{锆石}\% + \text{电气石}\% + \text{金红石}\% \quad (4)$$

$$\text{ATi指数} = \frac{100 \times \text{磷灰石}\%}{\text{磷灰石}\% + \text{电气石}\%} \quad (5)$$

$$\text{GZi指数} = \frac{100 \times \text{石榴子石}\%}{\text{石榴子石}\% + \text{锆石}\%} \quad (6)$$

随着粒径的增大,巴兰河的ZTR指数值减小(除BLH-3样品)、ATi值减小、Gzi值增大(图7)。63~125 μm 粒度组分的样品ZTR指数明显高于125~250 μm 粒度组分(除BLH-3样品),这说明细颗粒组分的成熟度更高。河流分选作用同时作用于粗细颗粒,但细颗粒组分搬运距离更远,更易被风化磨蚀,使细颗粒组分的成熟度更高^[24]。而125~250 μm 粒度组分的ATi指数相比于63~125 μm 粒度组分较低的原因可能是由于水动力分选作用,粗颗粒组分沉积速率较快,风化程度弱,ATi指数较低^[24]。石榴子石富集于125~250 μm 组分,分选作用下的石榴子石优先富集于粗颗粒组分,使GZi指数高于细颗粒组分。从巴兰河沉积物的重矿物特征指数上看,其值明显受到粒度效应的影响,重矿物特征指数无法最小化或者消除由粒度效应带来的偏差,这说明河流沉积物从上游到下游的搬运和沉积过程中,在水动力的作用下进行分选,粗、细颗粒发生分离,从而导致混合矿物分离进入不同粒级组分,不同河段的重矿物组成存在显著差异,很难根据较少样品代表整条巴兰河的重矿物特征^[17]。两个组分的重矿物呈现不同的含量组成,明显体现河流作用对重矿物组成的影响。

5 结论

(1) 巴兰河沉积物在河流搬运过程中因矿物分选而发生了显著变化。河流沉积物在搬运和沉积过程中,由于水动力分选作用,粗、细颗粒发生分离,从而导致混合矿物分离进入不同粒级组分,不同河段不同组分的重矿物组成存在显著差异,这种差异明显体现了小型集水区河流搬运作用对重矿物组成的影响。

(2) 巴兰河沉积物的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr和¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd及不活动元素比值变化较小,所有指标均指示巴兰河沉积物经历了较弱程度的化学风化作用、成熟度较低,处于初次循环,其物源主要来源于长英质火成岩。河过程没有对巴兰河沉积物的地球化学组成造成明显影响,可以准确恢复源区母岩性质。

(3) 从巴兰河整体的重矿物特征以及地球化学组成来看,重矿物在不同粒度组分的变化较为明显。对于大型河流而言,长距离搬运不能在不同粒径中均匀混合重矿物,而对于小型河流巴兰河而言,短距离的搬运更难均匀混合重矿物。在地球化学组成上,Sr-Nd同位素与不活动元素比值结合能够较好地反映巴兰河的物源。因此,在研究小型河流时,过少的样品很难代表整个流域的重矿物组成。相比于重矿物而言,地球化学组成能够较好地进行物源示踪并反映流域情况。

致谢 对提供宝贵修改意见的评审专家,一并谨致谢忱。感谢编辑部老师的辛勤付出,使论文得以完善。地球化学组成以及Sr-Nd同位素组成得到兰州大学甘肃省西部矿产资源重点实验室熊聪慧、闫晓丽和陈万峰老师的支持,重矿物组成得到了河北廊坊诚信地质公司李鹏、张云丹以及张佩莹老师的支持,研究生李思琪、孙杨、孙建华、李秋杭、侯心茹、符锦霞参与了论文写作讨论,在此一并表示感谢。

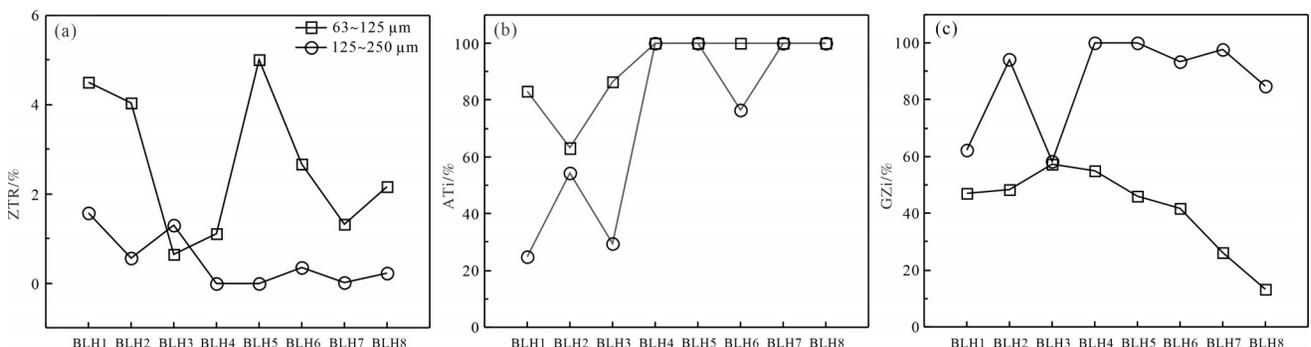


图7 巴兰河沉积物重矿物特征指数

Fig.7 Heavy mineral characteristic index of Balan River sediments

参考文献 (References)

- [1] McLennan S M, Taylor S R, Kröner A. Geochemical evolution of Archean shales from South Africa. I. The Swaziland and Pongola Supergroups[J]. *Precambrian Research*, 1983, 22(1/2): 93-124.
- [2] 李明月, 孙学军, Karki K, 等. 喜马拉雅山中段柯西河跨境流域河流沉积物的矿物和元素特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2019, 38(5): 989-997. [Li Mingyue, Sun Xuejun, Karki K, et al. Mineral and elemental characteristics of bed sediments in the trans-boundary Koshi River basin in the central Himalayas[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2019, 38(5): 989-997.]
- [3] 陈丹婷, 彭渤, 方小红, 等. 洞庭湖“四水”入湖河床沉积物主量元素地球化学特征及意义[J]. *第四纪研究*, 2021, 41(5): 1267-1280. [Chen Danting, Peng Bo, Fang Xiaohong, et al. Geochemistry of major elements in bed sediments from inlets of the four rivers to Dongting Lake, China[J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41(5): 1267-1280.]
- [4] 杨允柳, 何云龙, 解习农, 等. 湄公河三角洲第四系沉积物地球化学特征及其地质意义[J]. *地球科学*, 2022, 47(3): 1107-1121. [Yang Yunliu, He Yunlong, Xie Xinong, et al. Geochemical characteristics and geological significance of Quaternary sediments in the Mekong delta[J]. *Earth Science*, 2022, 47(3): 1107-1121.]
- [5] 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.
- [6] Guo Y L, Yang S Y, Su N, et al. Revisiting the effects of hydrodynamic sorting and sedimentary recycling on chemical weathering indices[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 227: 48-63.
- [7] Wu P, Xie Y Y, Kang C G, et al. Effects of provenance, transport processes and chemical weathering on heavy mineral composition: A case study from the Songhua River drainage, NE China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 839745.
- [8] Barbour G B. Physiographic history of the Yangtze[J]. *The Geographical Journal*, 1936, 87(1): 17-32.
- [9] Zheng H B. Birth of the Yangtze River: Age and tectonic-geomorphic implications[J]. *National Science Review*, 2015, 2(4): 438-453.
- [10] Wei H H, Wang E, Wu G L, et al. No sedimentary records indicating southerly flow of the paleo-upper Yangtze River from the first bend in southeastern Tibet[J]. *Gondwana Research*, 2016, 32: 93-104.
- [11] 魏传义, 尹功明, 刘春茹, 等. 长江现代河流沉积物石英 ESR 信号强度空间分布特征及其物源示踪意义[J]. *第四纪研究*, 2022, 42(4): 1168-1180. [Wei Chuanyi, Yin Gongming, Liu Chunru, et al. Spatial diversity of quartz ESR signal intensity of the modern Yangtze River fluvial sediments and its implications for sediment provenance[J]. *Quaternary Sciences*, 2022, 42(4): 1168-1180.]
- [12] 李吉均, 方小敏, 马海洲, 等. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起[J]. *中国科学: 地球科学*, 1996, 26(4): 316-322. [Li Jijun, Fang Xiaomin, Ma Haizhou, et al. Geomorphological and environmental evolution in the upper reaches of the Yellow River during the Late Cenozoic[J]. *Science China: Earth Sciences*, 1996, 26(4): 316-322.]
- [13] 傅建利, 张珂, 马占武, 等. 中更新世晚期以来高阶地发育与中游黄河贯通[J]. *地学前缘*, 2013, 20(4): 166-181. [Fu Jianli, Zhang Ke, Ma Zhanwu, et al. The terrace (T5 and T4) formation since the late Middle Pleistocene and its implication in the through cutting of the middle reach of Yellow River[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(4): 166-181.]
- [14] 赵希涛, 杨艳, 贾丽云, 等. 论晚期共和古湖时代、演化过程及其与地壳运动和黄河发育的关系[J]. *地球学报*, 2021, 42(4): 451-471. [Zhao Xitao, Yang Yan, Jia Liyun, et al. A discussion on the age and evolution process of the late Gonghe paleolake and its relations with the crustal movement and the development of the Yellow River[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021, 42(4): 451-471.]
- [15] 宋国利, 刘钊, 于桂云. 黑龙江省松花江流域主要岩石类型中若干元素的背景含量及其环境意义[J]. *哈尔滨师范大学自然科学学报*, 1986(4): 113-121. [Song Guoli, Liu Zhao, Yu Guiyun. Background contents and environmental significance of some elements in major rock types in Songhua River basin[J]. *Natural Science Journal of Harbin Normal University*, 1986(4): 113-121.]
- [16] Xie Y Y, Kang C G, Chi Y P, et al. Reversal of the middle-upper Songhua River in the late Early Pleistocene, northeast China[J]. *Geomorphology*, 2020, 369: 107373.
- [17] 李思琪, 谢远云, 康春国, 等. 物源—河流过程—化学风化对松花江水系沉积物重矿物组成的影响[J]. *地质科学*, 2022, 57(1): 207-229. [Li Siqi, Xie Yuanyun, Kang Chunguo, et al. Influence of provenance-river process-chemical weathering on heavy mineral composition of the Songhua River sediment[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2022, 57(1): 207-229.]
- [18] 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.]
- [19] 魏振宇, 谢远云, 康春国, 等. 早更新世松花江水系反转: 来自荒山岩芯 Sr-Nd 同位素特征指示[J]. *沉积学报*, 2020, 38(6): 1192-1203. [Wei Zhenyu, Xie Yuanyun, Kang Chunguo, et al. The inversion of the Songhua River system in the Early Pleistocene: Implications from Sr-Nd isotopic composition in the Harbin Huangshan cores[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(6): 1192-1203.]
- [20] 孙忠, 贾长青. 松花江流域蓄滞洪区建设有关问题探讨[J]. 东

- 北水利水电, 2007, 25(10): 31-33. [Sun Zhong, Jia Changqing. Discussion on the construction of flood storage and detention area in Songhua River basin[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2007, 25(10): 31-33.]
- [21] 魏春艳, 谢远云, 康春国, 等. 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, 2022, 57(1): 172-189. [Wei Chunyan, Xie Yuanyun, Kang Chunguo, et al. Sedimentological, mineralogical, and geochemical characteristics of the Luojiawopeng Fm. in Harbin: Implications for the sedimentary environment[J]. Chinese Journal of Geology, 2022, 57(1): 172-189.]
- [22] 袁方, 谢远云, 迟云平. 哈尔滨沙尘暴天气沉降物的物质组成及其对物源的限制[J]. 中国地质, 2018, 45(6): 1177-1187. [Yuan Fang, Xie Yuanyun, Chi Yunping. Material characteristics of dust fallouts during the dust-storm weather in Harbin: Constraint on the provenance[J]. Geology in China, 2018, 45(6): 1177-1187.]
- [23] 孙建华, 谢远云, 康春国, 等. 大兴安岭东麓平安镇白土山组的地层属性: 对物源和沉积环境的指示[J]. 地层学杂志, 2022, 46(2): 196-208. [Sun Jianhua, Xie Yuanyun, Kang Chunguo, et al. Stratigraphic properties of the Baitushan Formation in Ping'an town, the eastern foot of the Great Hinggan Mountains: An indication of provenance and sedimentary environment[J]. Journal of Stratigraphy, 2022, 46(2): 196-208.]
- [24] 孙磊, 谢远云, 康春国, 等. 呼伦贝尔沙地重矿物、Sr-Nd同位素组成及其对亚洲风尘系统的指示[J]. 中国地质, 2021, 48(6): 1965-1974. [Sun Lei, Xie Yuanyun, Kang Chunguo, et al. Heavy minerals, Sr-Nd isotopic composition of sandy land in Hulun Buir, Inner Mongolia and their implications for Asian aeolian dust system[J]. Geology in China, 2021, 48(6): 1965-1974.]
- [25] 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 Chang'an, 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.]
- [26] 王嘉新, 谢远云, 康春国, 等. 哈尔滨荒山岩心重矿物特征对松花江第四纪水系演化的指示[J]. 第四纪研究, 2020, 40(1): 79-94. [Wang Jiaxin, Xie Yuanyun, Kang Chunguo, et al. The indication of the heavy mineral characteristics of the core in Harbin Huangshan to the Quaternary drainage evolution of Songhua River[J]. Quaternary Sciences, 2020, 40(1): 79-94.]
- [27] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985: 57-72.
- [28] 由文智, 向芳, 黄恒旭, 等. 青藏高原东缘宜宾地区第四纪河流沉积物中铁质重矿物特征及物源意义[J]. 地学前缘, 2022, 29(4): 278-292. [You Wenzhi, Xiang Fang, Huang Hengxu, et al. Characteristics and provenance significance of iron-rich heavy minerals in Quaternary fluvial sediments in Yibin area, eastern margin of Tibetan Plateau[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(4): 278-292.]
- [29] 田豹. 重矿物物源分析研究进展[J]. 中国锰业, 2017, 35(1): 107-109, 115. [Tian Bao. A research progress in provenance analysis of heavy minerals[J]. China's Manganese Industry, 2017, 35(1): 107-109, 115.]
- [30] 毛光周, 刘池洋. 地球化学在物源及沉积背景分析中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(4): 337-348. [Mao Guangzhou, Liu Chiyang. Application of geochemistry in provenance and depositional setting analysis[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(4): 337-348.]
- [31] Nesbitt H W, Young G M, McLennan S M, et al. Effects of chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implications for provenance studies[J]. The Journal of Geology, 1996, 104(5): 525-542.
- [32] Lacey J P, Evrard O, Smith H G, et al. The challenges and opportunities of addressing particle size effects in sediment source fingerprinting: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2017, 169: 85-103.
- [33] 李绪龙, 张霞, 林春明, 等. 常用化学风化指标综述: 应用与展望[J]. 高校地质学报, 2022, 28(1): 51-63. [Li Xulong, Zhang Xia, Lin Chunming, et al. Overview of the application and prospect of common chemical weathering indices[J]. Geological Journal of China Universities, 2022, 28(1): 51-63.]
- [34] 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.
- [35] Parker A. An index of weathering for silicate rocks[J]. Geological Magazine, 1970, 107(6): 501-504.
- [36] Nicholls G D. Environmental studies in sedimentary geochemistry[J]. Science Progress, 1963, 51(201): 12-31.
- [37] 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.
- [38] 陈骏, 安芷生, 刘连文, 等. 最近 2.5Ma 以来黄土高原风尘化学组成的变化与亚洲内陆的化学风化[J]. 中国科学: 地球科学, 2001, 31(2): 136-145. [Chen Jun, An Zhisheng, Liu Lianwen, et al. Variations in chemical compositions of the eolian dust in Chinese Loess Plateau over the past 2.5 Ma and chemical weathering in the Asian inland[J]. Science China: Earth Sciences, 2001, 31(2): 136-145.]
- [39] Cullers R L, Podkovyrov 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(1/2): 77-93.
- [40] Ahmad I, Chandra R. Geochemistry of loess-paleosol sediments of Kashmir Valley, India: Provenance and weathering[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 66: 73-89.

- [41] Dey S, Rai A K, Chaki A. Palaeoweathering, composition and tectonics of provenance of the Proterozoic intracratonic Kaladgi-Badami Basin, Karnataka, southern India: Evidence from sandstone petrography and geochemistry[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(6): 703-715.
- [42] Armstrong-Altrin J S, Machain-Castillo M L. Mineralogy, geochemistry, and radiocarbon ages of deep sea sediments from the gulf of Mexico, Mexico[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2016, 71: 182-200.
- [43] Ohta T. Geochemistry of Jurassic to earliest Cretaceous deposits in the Nagato Basin, SW Japan: Implication of factor analysis to sorting effects and provenance signatures[J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 171(1/2/3/4): 159-180.
- [44] 李秋杭, 谢远云, 康春国, 等. 基于人工和TIMA自动化方法的松花江水系重矿物组成: 对源—汇物源示踪的指示[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(3): 170-183. [Li Qiuhan, Xie Yuanyun, Kang Chunguo, et al. Heavy mineral composition of the Songhua River system identified by manual and TIMA automatic methods and implications for provenance tracing[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(3): 170-183.]
- [45] Cullers R L, Basu A, Suttner L J. Geochemical signature of provenance in sand-size material in soils and stream sediments near the tobacco root batholith, Montana, U. S. A. [J]. *Chemical Geology*, 1988, 70(4): 335-348.
- [46] Cullers R L. The controls on the major- and trace-element evolution of shales, siltstones and sandstones of Ordovician to Tertiary age in the Wet Mountains region, Colorado, U. S. A. [J]. *Chemical Geology*, 1995, 123(1/2/3/4): 107-131.
- [47] Condie K C, Wronkiewicz D J. The Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 97(3/4): 256-267.
- [48] Feng R, Kerrich R. Geochemistry of fine-grained clastic sediments in the Archean Abitibi greenstone belt, Canada: Implications for provenance and tectonic setting[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(4): 1061-1081.
- [49] Spalletti L A, Queralti I, Matheos S D, et al. Sedimentary petrology and geochemistry of siliciclastic rocks from the Upper Jurassic Tordillo Formation (Neuquén Basin, western Argentina): Implications for provenance and tectonic setting[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2008, 25(4): 440-463.
- [50] Hayashi K I, Fujisawa H, Holland H D, et al. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(19): 4115-4137.
- [51] Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio[J]. *The Journal of Geology*, 1986, 94(5): 635-650.
- [52] Ling Z Y, Yang S L, Xia D S, et al. Source of the aeolian sediments in the Yarlung Tsangpo valley and its potential dust contribution to adjacent oceans[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2022, 47(7): 1860-1871.
- [53] Xie Y Y, Liu L, Kang C G, et al. Sr-Nd isotopic characteristics of the northeast sandy land, China and their implications for tracing sources of regional dust[J]. *CATENA*, 2020, 184: 104303.
- [54] 郑海飞, 郝瑞霞. 普通地球化学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007: 76-79. [Zheng Haifei, Hao Ruixia. *General geochemistry* [M]. Beijing: Peking University Press, 2007: 76-79.]
- [55] Yang J D, Li G J, Rao W B, et al. Isotopic evidences for provenance of East Asian dust[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(29): 4481-4490.
- [56] Rao W B, Mao C P, Wang Y G, et al. Using Nd-Sr isotopes and rare earth elements to study sediment provenance of the modern radial sand ridges in the southwestern Yellow Sea[J]. *Applied Geochemistry*, 2017, 81: 23-35.
- [57] Bayon G, Toucanne S, Skonieczny C, et al. Rare earth elements and neodymium isotopes in world river sediments revisited[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, 170: 17-38.
- [58] Morton A C, Hallsworth C R. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones[J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 124(1/2/3/4): 3-29.
- [59] 何梦颖. 长江河流沉积物矿物学、地球化学和碎屑锆石年代学物源示踪研究[D]. 南京: 南京大学, 2014. [He Mengying. *The provenance study on the Yangtze River sediments, based on mineralogy, geochemistry and detrital zircon dating*[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.]

Effects of Fluvial Processes on Sediment Geochemistry and Heavy Mineral Composition in a Small Catchment: A case study of the Balan River

ZHAO HuiYing¹, XIE YuanYun^{1,2}, CHI YunPing^{1,2}, KANG ChunGuo³, WU Peng¹, SUN Lei¹, WEI ZhenYu¹

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

2. Heilongjiang Province Key Laboratory of Geographical Environment Monitoring and Spatial Information Service in Cold Regions, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

3. Geography Department, Harbin University, Harbin 150086, China

Abstract: [Objective] River sediments record abundant information about their source, which is significant for exploring weathering, the transport-sedimentation cycle and parent rock composition in the source region of the basin. Unlike large watersheds that may integrate a range of weathering mechanisms and contain complex rock types, small rivers have similar climatic and lithological backgrounds, which provides valuable information when studying sediment composition. [Methods] In order to explore the influence of fluvial processes on sediment composition, eight samples were obtained from the upper and lower of the Balan River for granular processing (<63 μm , 63-125 μm , 125-250 μm). The <63 μm samples were subjected to geochemical testing (major, trace, rare earth and Sr-Nd isotopes). The 63-125 μm and 125-250 μm samples were tested for heavy minerals. [Results] It was found that the sediments in the Balan River have undergone low chemical weathering, are of low maturity, and are in the primary cycle of deposition. The provenance is mainly from felsic parent rock. The provenance indices (La/Sc, Co/Th, Cr/Th, Th/Sc) and Sr-Nd isotopic compositions showed little change overall, which represents the overall characteristics of the Balan River basin. [Conclusions] The Balan River samples showed consistent chemical weathering, maturity levels, recycling characteristics and host rock properties, indicating that the fluvial process had not significantly affected their geochemical composition. The heavy minerals were diluted and mixed after river transport; those from different river reaches and with different grain size fractions showed obviously different compositional content. This indicates that short-distance transport is unlikely to evenly distribute heavy minerals within different grain size fractions. Therefore, when studying river source-sink systems, a small number of samples does not necessarily represent the heavy mineral composition of the entire basin, even in small rivers. This study also emphasizes that the combination of Sr-Nd isotope and inactive element ratio can be used effectively for river provenance tracing.

Key words: Balan River; fluvial process; geochemical composition; heavy mineral; Sr-Nd isotope