



海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

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

李秋杭，谢远云，康春国，迟云平，吴 鹏，孙 磊，李思琪

Heavy mineral composition of the Songhua River system identified by manual and TIMA automatic methods and implications for provenance tracing

LI Qiuhang, XIE Yuanyun, KANG Chunguo, CHI Yunping, WU Peng, SUN Lei, and LI Siqi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021093001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202

珠江口盆地阳江东凹始新统的源汇过程：碎屑锆石定年及物源示踪

Tracing source-to-sink process of the Eocene in the Eastern Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin: Evidence from detrital zircon spectrum

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 124

南海北部神狐海域SH37岩芯浊流沉积及其物源分析

Turbidity deposits and their provenance: evidence from core SH37 in Shenhua area of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 101

莱州湾表层沉积物重金属分布特征、污染评价与来源分析

Spatial distribution of heavy metals in the surface sediments of Laizhou Bay and their sources and pollution assessment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 67

南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112

西太平洋弧后盆地的热液系统及其岩浆环境研究

Seafloor hydrothermal system and its magmatic setting in the western Pacific back-arc basins

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 12



关注微信公众号，获得更多资讯信息

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 Qiuhang, 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.

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

李秋杭¹, 谢远云^{1,2}, 康春国³, 迟云平^{1,2}, 吴鹏¹, 孙磊¹, 李思琪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: 松花江水系作为中国东北地区最主要的河流系统, 其重矿物组成对于揭示其沉积环境、沉积物源-汇过程和水系演化等地表过程具有重要意义。但目前对松花江水系重矿物组成了解有限, 对影响其重矿物组成的控制因素尚不清晰。为此, 在松花江干流和 10 个主要支流的边滩采集河流沙样品, 在通河获取 2 个松花江 T3 阶地样品, 分别采用 TESCAN Integrated Mineral Analyzer (TIMA) 自动化矿物识别技术和人工方法, 对 63~250 μm 粒级组分进行重矿物分析, 旨在给出松花江水系的重矿物组成, 并分析物源、河流过程和化学风化等因素对重矿物组成的影响和控制, 以及评估人工和 TIMA 方法在重矿物鉴定中的应用情况。结果表明, 发源于不同山岭 (大兴安岭、小兴安岭和长白山) 的各支流具有显著不同的重矿物组成, 角闪石、榍石、绿帘石、白钛石、辉石、钛铁矿和赤、褐铁矿是区分各物源的指示性矿物。源自大兴安岭的嫩江支流具有显著高含量的辉石 (诺敏河)、钛铁矿 (甘河、多布库尔河和阿伦河) 和赤、褐铁矿 (甘河、多布库尔河和雅鲁河), 显示了基性火成岩物质对重矿物组成的控制, 这在现代河床砾石的岩性中得到证明。然而, 在松花江干流中, 这些重矿物含量显著降低, 显示了极弱的大兴安岭源区信息, 表明支流物源对重矿物组成的控制受到干流所携带沉积物的削弱, 干流物源占据了主导地位。值得指出的是, 松花江干流的重矿物组成显示出为拉林河和第二松花江物源的混合, 表明干流更多地继承了松嫩平原东南山岭 (长白山余脉) 的重矿物信息。受到严重化学风化影响的通河 T3 阶地样品的重矿物组成简单, 辉石和角闪石等抗风化能力弱的不稳定重矿物已完全消失, 而稳定矿物高度富集, 反映了化学风化对重矿物组成起到主要控制作用。相对于传统人工鉴定方法得到的重矿物组成 (通常只能鉴定出 20 余种矿物相), TIMA 方法能够给出更多的矿物种类信息 (通常能识别出 40 余种矿物相), 但在识别同质异相和多晶型矿物方面存在不足。

关键词: 重矿物; TIMA 分析; 物源; 化学风化; 河流过程; 松花江水系

中图分类号:P575; P736 文献标识码:A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021093001

Heavy mineral composition of the Songhua River system identified by manual and TIMA automatic methods and implications for provenance tracing

LI Qiuhang¹, XIE Yuanyun^{1,2}, KANG Chunguo³, CHI Yunping^{1,2}, WU Peng¹, SUN Lei¹, LI Siqi¹

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 Institute, Harbin 150086, China

Abstract: The Songhua River is the most important fluvial system in northeast China and its heavy mineral composition is of great significance to the revealing of depositional environment, source-sink relationship and drainage evolution. However, the current study concerning the heavy

资助项目: 国家自然科学基金“松嫩平原下更新统砂砾石地层特征及其对构造-地貌-气候-水系演化的指示”(42171006), “钻井岩芯记录的松嫩平原松花江第四纪水系演化: 对构造-地貌-气候变化的响应”(41871013); 黑龙江省自然科学基金“松嫩平原第四纪沉积记录对松花江水系演化及区域干旱化进程的响应”(LH2020D009)

作者简介: 李秋杭(1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为第四纪地质与环境变化, E-mail: 1446273496@qq.com

通讯作者: 谢远云(1971—), 男, 博士, 教授, 主要从事第四纪研究, E-mail: xyy0451@hrbnu.edu.cn

收稿日期: 2021-09-30; **改回日期:** 2021-11-28. 文凤英编辑

mineral composition of the Songhua River system is very limited, and the factors affecting the composition of heavy minerals are not clear up to date. In order to solve the problem, sand samples are collected along the banks of the main stream and 10 major tributaries of the river system, in addition to the two from the T3 terraces of the Tonghe River. Using the new automated mineral identification technology TESCAN Integrated Mineral Analyzer (TIMA) and the manual method respectively, heavy mineral analysis of the sample components in depth of 63~250 m is carried out for the samples. The influences of sediment sources, fluvial processes and chemical weathering on the heavy mineral composition of the Songhua River system are discussed. The results show that the tributaries sediments are sourced from different mountains, such as the Great Hinggan Mountains, the Lesser Hinggan Mountains and the Changbai Mountains. These mountains are significantly different in heavy mineral composition, and the heavy minerals of hornblende, titanite, epidote, leucoxene, augite, ilmenite and hematite+limonite are effective indicators to distinguish the water systems of different sources. The Nenjiang tributaries are originated from the Great Hinggan Mountains, of which sediments are rich in augite (the Nuomin River), ilmenite (the Ganhe River, Duobukuer River and Alun River) and hematite+limonite (the Ganhe River, Duobukuer River and Yalu River), showing the control of the basal source over heavy mineral composition, which can be observed in the modern riverbed gravels. However, in the main stream of the Songhua River, those heavy minerals are significantly reduced, suggesting that the influence of the Great Hinggan Mountains, as a source area, is extremely weak and the source control of heavy mineral composition is heavily influenced by river process. It is worth to point out that the heavy mineral composition of the Songhua River main stream is the mixture of the Lalin River and the Second Songhua River, indicating that the main stream of the Songhua River has inherited more heavy mineral information from the southeastern mountains of the Songnen Plain (the remnants of Changbai Mountain). The composition of heavy minerals in T3 terrace samples of Tonghe, which was severely affected by chemical weathering, is extremely simple, the unstable heavy minerals such as augite and hornblende have completely disappeared, and stable minerals are highly enriched, reflecting the control of chemical weathering over heavy mineral composition. Compared with the traditional manual identification of monotonous heavy mineral composition (usually only more than 20 mineral species can be identified), the TIMA method can reveal more mineral information (usually more than 40 mineral species can be identified), but there are shortcomings in identifying homogenous and polymorphic minerals.

Key words: heavy minerals; TIMA analyses; provenance; chemical weathering; river processes; Songhua River system

重矿物是指沉积物中密度超过 2.89 g/cm^3 的矿物, 在沉积岩中质量比仅为 1% 左右, 一般作为母岩的副矿物存在, 种类丰富、耐磨蚀、稳定性强, 在流域沉积物的研究中具有重要意义^[1-3]。河流是陆源碎屑物质远距离迁移的重要渠道之一, 记载了流域内大量地质信息^[4-5]。通过对河流沉积物中的重矿物进行分析, 可以探究物质运输规律^[6-7]、流域风化剥蚀特征^[8-9]、判断物质来源^[10-11]、进行地层对比分析^[12]、了解构造演化^[13-17]等。但在河流搬运沉积过程中, 重矿物组成会受到母岩岩性以及外力作用(风化、埋藏成岩、机械磨损)等因素的影响而发生改变^[18]。因此, 在通过重矿物分析方法进行研究时, 需要首先评估重矿物组成的影响因素。

人工鉴定(光学)是检测重矿物的常用方法, 目前可检测的透明和不透明重矿物均超过 60 种^[19], 对仪器平台要求较低, 可获取大量数据信息。但该方法耗时费力、分析颗粒数量有限, 结果准确性受到鉴定人员的知识储备和经验影响^[2]。TESCAN Integrated Mineral Analyzer(TIMA)是一种基于 SEM-EDS 的自动扫描电子显微镜, 自带矿物数据库涵盖近 5 000 种矿物, 能够识别直径小于 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒^[20-22], 测量参数可根据具体研究进行定制, 可以实现矿物检测的自动化、高速率和高分辨率。在第四纪地质学研究中, TIMA 技术广泛应用于重建沉积地层^[23]

和沉积环境^[24-25] 以及在年代地层研究中提供补充数据^[26]等方面。

众多学者对长江和黄河的重矿物组成进行了广泛研究^[27-29]。松花江作为东北地区最重要的河流^[30], 其研究集中于 20 世纪 70—90 年代, 研究方法主要集中于地貌学方面^[31]。近年来, 一些学者利用重矿物对松花江水系演化模式进行了详细讨论^[30,32], 但影响其重矿物组成因素的工作尚未展开。此外, 人工与 TIMA 方法的比较没有广泛应用于中国的主要河流。为此, 本文以松花江主干河道、主要支流和河流阶地沉积物中的重矿物为研究对象, 利用人工与 TIMA 两种鉴定方法对松花江水系沉积物进行重矿物分析, 揭示重矿物组成的影响因素, 通过与人工方法的比较, 进而评估 TIMA 方法在重矿物鉴定中的应用。此项研究将为今后东北地区源汇过程、物源示踪和水系构造演化等研究奠定基础。

1 研究区概况

松花江流域($41^{\circ}42' \sim 51^{\circ}38' \text{ N}$ 、 $119^{\circ}52' \sim 132^{\circ}31' \text{ E}$)位于中国东北的松嫩平原。流域三面环山, 东南部为长白山山脉, 西部和西北部与大兴安岭相连, 北部和东北部与小兴安岭相邻(图 1)。由于松花江流经不同的造山带, 形成了不同的地质构

造(图2)。流域内侵入岩和喷出岩分布广泛,主要包括花岗岩、混合花岗岩、玄武岩、安山岩、流纹岩、中酸性凝灰岩和中酸性凝灰熔岩。其岩石分布大致为:大兴安岭以花岗岩和中酸性火山岩为主,包含少量玄武岩;小兴安岭、张广才岭和长白山以花岗岩、混合花岗岩、玄武岩和变质岩为主(图2)。松嫩平原和三江平原第四纪松散沉积物分布广泛^[33]。

松花江是中国七大河之一,也是黑龙江在中国境内的最大支流,流经黑龙江、吉林、内蒙古三省^[34-35]。总长1927 km,东西长920 km,南北宽1070 km,流域面积 55.72×10^4 km²,占黑龙江总流域面积的30.2%,年径流量 762×10^8 m³^[36]。松花江有南北两源,南源为第二松花江,即为正源,发源于长白山天池,一般作为松花江干流源头;北源为嫩江,也是松

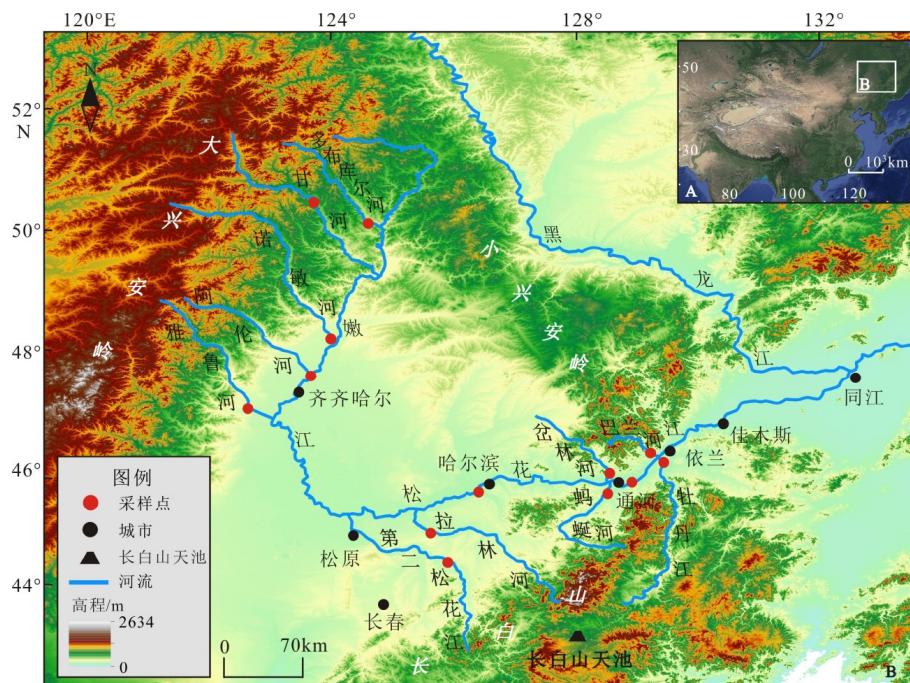


图1 松花江水系及采样位置示意图

Fig.1 DEM map of Songnen Plain, showing the distribution of the Songhua River drainage system and sample

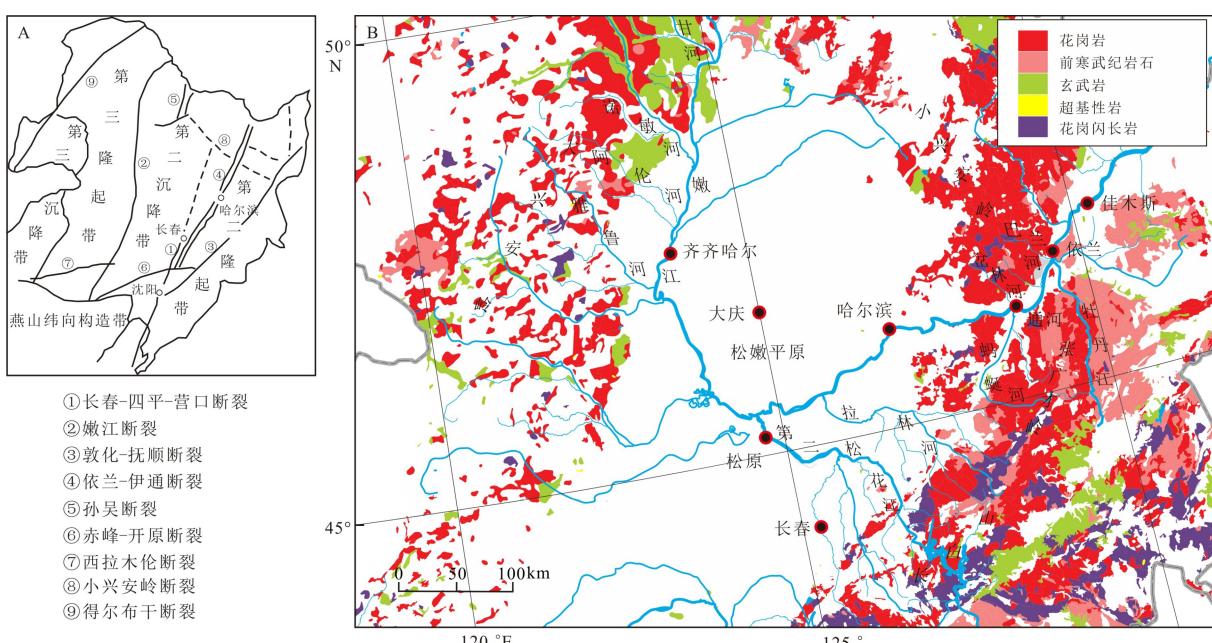


图2 松花江水系地质图^[37-38]

Fig.2 Geological map of the Songhua River drainage^[37-38]

花江第一大支流, 源自大兴安岭的伊勒呼里山, 其支流包括雅鲁河、阿伦河、诺敏河、甘河和多布库尔河等。两源在吉林省三岔河镇汇合形成东流松花江, 最终流至同江市注入黑龙江(图 1)^[39]。根据东流松花江地形及河道特征, 将三岔河-哈尔滨分为上游, 右岸与拉林河相连; 哈尔滨-佳木斯为中游, 其支流包括岔林河、蚂蜒河、巴兰河和牡丹江等; 佳木斯-同江为下游^[40]。

2 采样与实验过程

2.1 样品采集与处理

河流样品取自松花江主干河道以及主要支流的现代河床边滩冲积沙(图 1), 共获样品 12 个。此外, 在通河县野外考察中发现了松花江 T3 堆积阶地($46^{\circ}03'68''$ N, $129^{\circ}01'10''$ E), 阶地底部海拔高度 37 m, 出露厚度约 9~10 m。阶地具有明显的二元结构, 上部为棕红色河漫滩相砾粉砂质泥, 下部为灰白色河床相砂砾石层^[31,40]。在该堆积阶地西侧约 2 km 的基座阶地的基岩为风化严重的花岗岩。为评估化学风化过程对重矿物组成的影响, 在通河松花江三级河流阶地的河床相砂透镜体和河漫滩相泥质粉砂中分别采集 1 个样品。样品均通过干筛法获取 $63\sim250\text{ }\mu\text{m}$ 粒级组分, 送至河北省廊坊市诚信地质服务公司分别进行人工及 TIMA 重矿物鉴定。

2.2 实验方法

2.2.1 人工鉴定过程

首先将全部样品烘干称重, 加入离散剂初淘, 再用三溴甲烷(密度 2.89 g/cm^3)进行精淘, 使轻、重矿物分离, 将被分离的样品用酒精反复冲洗至干净后, 在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温箱烘干后进行称重(精度 $<0.1\text{ mg}$), 随后进行磁选, 得到无磁、电磁、强磁颗粒后再次称重^[41]。最后将分离出的重矿物部分在双目实体显微镜下观察鉴定, 每个重矿物样品鉴定颗粒数均在 1 000 粒以上, 计算出每种重矿物的颗粒百分含量。每种重矿物的颗粒百分含量与所属部分(无磁、电磁和强磁)矿物质量的乘积可得出每种重矿物的质量, 进而可以计算出每种重矿物的质量百分含量^[19,42]。

2.2.2 TIMA 鉴定过程

将干筛后的 $63\sim250\text{ }\mu\text{m}$ 粒级子样品(除河流阶地样品)进行粗淘, 均匀倾倒在直径 2.5 cm 的环氧

树脂靶上, 对其进行抛光。随后在靶外部镀一层导电碳涂层以减少观测时产生的荷电, 并且能够增强二次电子或背散射电子信号, 获得更好的信噪比。样品选择高分辨率的解离分析点阵模式进行分析, 以获取 BSE 图和 EDS 数据, 每个点的 X 射线计数为 1 000 kcps, 像素间距为 $2\text{ }\mu\text{m}$, 能谱步长为 $9\text{ }\mu\text{m}$ 。测试条件: 高真空模式, 加速电压 25 kV , 电流 18.33 nA , 工作距离 15 mm , 光斑直径 66.5 nm , 区块(Field)长度 $1\,500\text{ }\mu\text{m}$, 电流和 BSE 信号强度使用铂法拉第杯自动程序校准, EDS 信号使用 Mn 标样校准。BSE 和 EDS 图像获取过程如下: TIMA 仪器首先快速获取整个样品的低分辨率 BSE 全景图像, 并选择样品靶中需要分析的区域(尽可能包含全部颗粒); 将所选测试区域平均切割成若干正方形区块; 以区块为单位, 样品台自动位移, 依次扫描; 在区块内, BSE 拍照和 EDS 测试以预先设定好的像素参数进行逐点分析; 测试完成后, TIMA 软件自动拼合统计每个区块内所获取的所有 BSE 图像和 EDS 数据。扫描结束后, 对结果进行分析处理。软件可以通过各种矿物的密度参数直接获取样品的质量百分含量^[20,43], 同时能够获取各个样品的矿物颗粒数、面积百分比、周长百分比和元素百分比(图 3)。每个样品鉴定颗粒数平均 18 000 颗, 其中重矿物颗粒数平均 10 000 颗。将所获各样品中的轻矿物数据去除, 重新计算各样品的重矿物质量百分含量, 得到本文中每个样品的重矿物重量百分比。

3 结果

重矿物鉴定结果见表 1。人工方法共鉴定出 24 种重矿物, 其中主要矿物为角闪石、绿帘石、榍石、钛铁矿、赤/褐铁矿和辉石; 锆石、磷灰石、金红石、锐钛矿、白钛石、电气石、磁铁矿和蓝晶石为次要矿物; 独居石、黄铁矿、黄铜矿、碳硅石、尖晶石、铬尖晶石、自然锌和十字石为偶见矿物, 含量极低, 不具有统计意义, 未在表中列出。

矿物的物理性质包括颜色、形态和光学性质等, 与物源和河流搬运过程关系密切^[44]。对于我们的研究, 锆石以浅玫瑰色和浅黄色为主, 粒状和次棱角至棱角柱状, 金刚光泽至玻璃光泽, 透明至半透明; 磷灰石, 无色、白色和烟灰色, 个别浅蓝色, 柱状和粒状, 毛玻璃光泽至玻璃光泽, 透明至半透明; 金红石, 红褐色、红色、黑褐色和黑色, 不规则粒状和板柱状, 油脂光泽和沥青光泽, 透明至半透明; 锐钛矿, 蓝灰色和橙黄色为主, 个别呈蓝绿色和浅褐

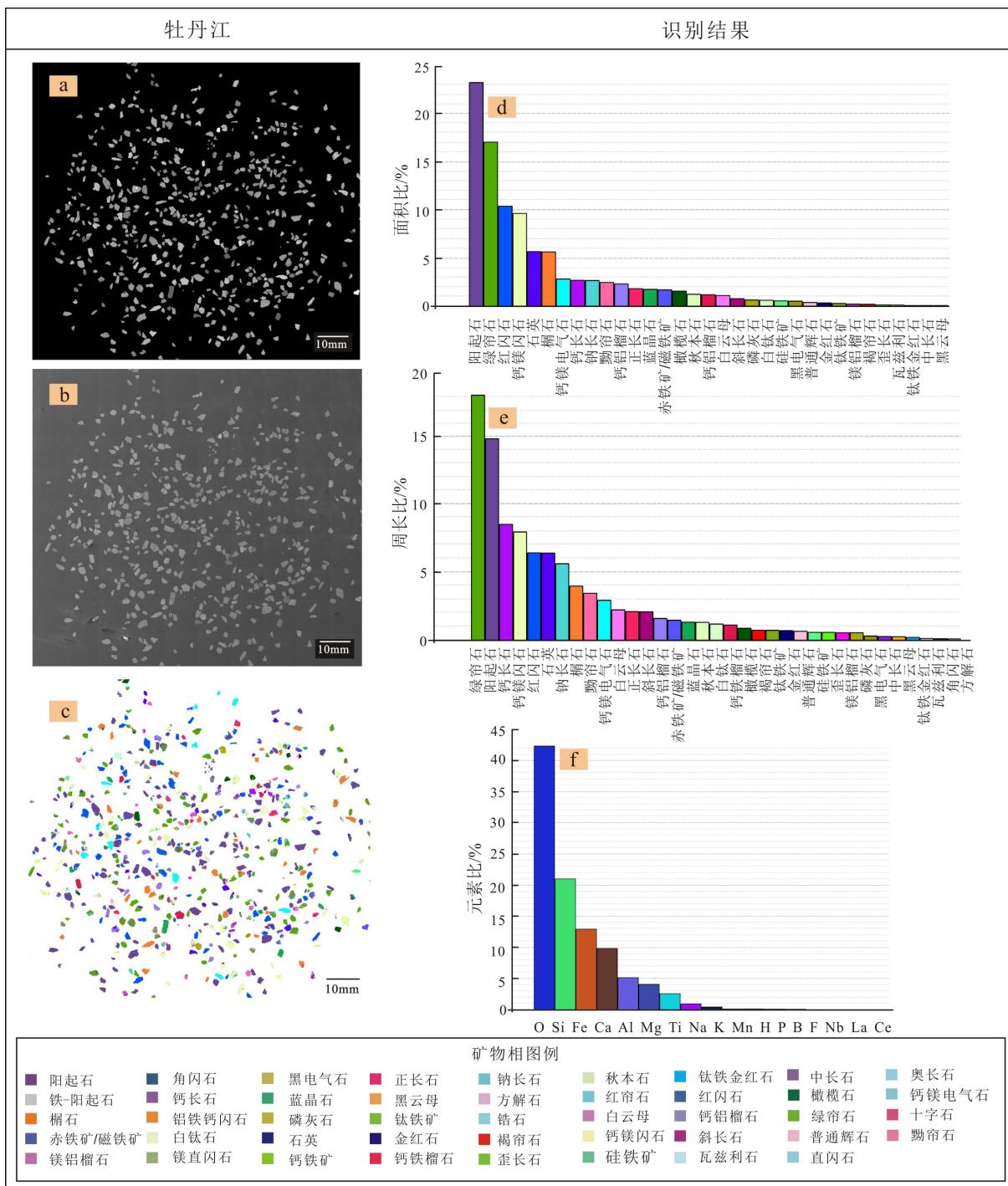


图3 松花江水系代表性样品的TIMA分析识别结果

a. BSE图, b. SEM图, c. 矿物相图, d. 各矿物面积比图, e. 各矿物周长比图, f. 各矿物元素比图。

Fig.3 Identification results of TIMA analysis of representative samples from the Songhua River system

a. BSE diagram, b. SEM diagram, c. mineral phase diagram, d. diagram of the area of each mineral, e. the perimeter ratio of each mineral, f. comparison of mineral elements.

黄色,粒状和板状,油脂光泽和蜡质光泽,透明至半透明;白钛石,灰白色、浅黄色和黄棕色,板状和粒状,个别信封状,蜡状光泽,不透明;榍石,浅黄色和浅褐黄色,板粒状,个别信封状,玻璃光泽,透明至半透明;角闪石,墨绿色、绿色和深褐色,板柱状和

板粒状,玻璃光泽至蜡质光泽,透明至半透明;电气石,茶褐色和深褐色,个别蓝色,柱状和粒状,玻璃光泽,透明;石榴子石,浅粉色和粉红色,个别浅黄色,不规则粒状,玻璃光泽,透明;绿帘石,草绿色和浅黄绿色,不规则粒状和柱状,玻璃光泽至毛玻璃

表 1 人工和 TIMA 检测松花江水系重矿物结果对比

Table 1 Comparison of artificial and TIMA results for heavy minerals in the Songhua River drainage

%

河流名	方法	Zr	Ap	Rt	Ant	Lcx	Spn	Amp	Tur	Gt	Ep	Px	Ilm	Hem+Lm	Mag	Ky
通河T3阶地a	人工	1.4	0.0	0.5	0.0	11.9	0.0	0.0	1.4	2.6	3.0	0.0	53.1	3.6	1.8	0.0
通河T3阶地b		3.9	1.1	0.4	0.07	0.8	2.0	0.0	4.7	2.7	0.07	0.0	74.4	2.7	0.0	0.0
牡丹江		0.01	0.3	0.03	0.03	0.6	7.2	56.7	0.2	3.5	14.0	6.0	1.2	1.0	1.2	0.0
第二松花江		0.05	0.5	0.0	0.0	1.5	3.2	59.2	0.0	2.8	12.7	6.0	2.8	2.8	1.8	0.05
拉林河		0.8	0.2	0.0	0.03	0.5	4.1	74.0	0.05	0.6	7.6	1.2	4.5	0.8	1.0	0.01
蚂蜒河		0.4	0.2	0.0	0.03	1.1	21.5	55.5	0.0	0.2	6.4	2.1	5.2	1.0	2.0	0.0
巴兰河		0.05	0.2	0.0	0.0	1.2	22.1	54.3	0.2	1.0	5.6	3.3	2.1	0.8	1.2	0.0
岔林河		0.6	0.8	0.04	0.07	0.4	28.5	46.8	0.0	0.2	4.7	1.6	5.1	2.6	5.1	0.0
阿伦河		1.2	0.3	0.1	0.2	3.8	7.0	8.1	0.7	0.07	57.9	1.1	11.7	1.8	0.5	0.0
诺敏河		0.01	0.3	0.0	0.0	3.9	2.3	14.6	0.0	0.0	37.2	27.1	1.4	2.3	0.5	0.0
甘河	TIMA	2.1	0.4	0.06	0.2	1.8	6.7	8.3	0.1	0.06	25.9	4.0	19.6	23.2	4.2	0.0
多布库尔河		1.6	1.1	0.03	0.3	2.3	11.4	8.6	0.0	0.5	27.4	1.1	22.8	13.0	4.6	0.0
雅鲁河		0.08	0.2	0.0	0.05	2.7	6.8	5.1	0.0	0.1	60.9	1.2	4.5	10.2	1.2	0.0
松花江哈尔滨段		0.6	1.1	0.06	0.03	1.5	4.4	48.7	0.5	1.5	24.6	4.4	5.0	1.3	2.5	0.04
牡丹江		0.02	0.7	0.7	0.0	1.0	7.2	48.2	3.9	4.8	23.8	0.5	0.5	0.0	3.2	2.3
第二松花江		0.03	0.1	0.3	0.0	0.1	4.0	54.2	1.0	0.9	25.8	0.1	1.6	0.0	6.1	0.0
拉林河		0.0	0.7	0.7	0.0	0.3	3.7	74.0	1.1	0.1	13.1	0.05	1.5	0.0	0.7	2.0
蚂蜒河		0.2	0.04	0.6	0.0	0.4	27.2	44.3	1.2	1.6	16.1	0.03	5.3	0.0	1.3	0.2
巴兰河		0.4	0.3	0.5	0.0	0.3	19.8	37.1	4.7	3.4	22.5	0.1	2.0	0.0	1.8	1.3
岔林河		0.2	0.7	1.9	0.0	2.1	32.4	35.8	0.5	0.5	8.9	0.1	9.9	0.0	4.4	0.09
阿伦河	TIMA	0.05	0.3	3.1	0.0	2.6	6.9	11.6	0.4	1.7	67.7	0.01	1.2	0.0	1.5	1.8
诺敏河		0.01	0.9	1.3	0.0	2.0	2.8	12.1	0.7	2.6	43.3	25.2	1.4	0.0	4.8	0.0
甘河		1.0	0.2	3.4	0.0	2.3	12.4	10.0	1.0	4.1	42.0	0.03	13.5	0.0	9.1	0.0
多布库尔河		0.7	1.3	3.5	0.0	2.9	15.5	6.7	1.1	8.5	32.6	0.09	13.4	0.0	13.1	0.2
雅鲁河		0.1	0.1	2.2	0.0	1.9	5.0	6.6	1.1	3.2	72.4	0.04	3.6	0.0	2.9	0.4
松花江哈尔滨段		0.2	1.4	0.6	0.0	1.1	4.4	53.0	2.1	1.1	29.6	0.04	2.8	0.0	1.4	0.2

注: Zr为锆石, Ap为磷灰石, Rt为金红石, Ant为锐钛矿, Lcx为白钛石, Spn为榍石, Amp为角闪石, Tur为电气石, Gt为石榴子石, Ep为绿帘石, Px为辉石, Ilm为钛铁矿, Hem+Lm为赤铁矿+褐铁矿, Mag为磁铁矿, Ky为蓝晶石。

光泽, 透明至半透明; 辉石, 绿色和浅绿色, 个别黄绿色和浅褐色, 板柱状和板粒状, 玻璃光泽, 透明; 钛铁矿呈铁黑色, 不规则粒状和板状, 金属至半金属光泽, 不透明; 赤/褐铁矿, 红褐色和黑褐色, 不规则粒状, 半金属光泽, 不透明; 磁铁矿为黑色, 粒状和八面体状, 金属至半金属光泽, 不透明; 蓝晶石, 无色, 个别浅蓝色, 板粒状和板柱状, 玻璃光泽, 透明, 部分见暗色包裹体。

源自长白山余脉的第二松花江、拉林河和牡丹江以角闪石(56.69%~73.97%)占绝对优势, 绿帘石

(7.63%~13.96%)、辉石(1.21%~6.04%)、榍石(3.2%~7.16%)、钛铁矿(1.17%~4.52%)和石榴子石(0.58%~3.51%)次之, 其他矿物(锆石、磷灰石、金红石、锐钛矿、白钛石、电气石、赤/褐铁矿、磁铁矿和蓝晶石)含量较少(<3%)。但对于同一物源的蚂蜒河, 其榍石(21.51%)和钛铁矿(5.16%)含量显著增加, 绿帘石(6.4%)含量下降。源于小兴安岭的巴兰河和岔林河具有与蚂蜒河相似的重矿物组成。松花江哈尔滨段样品中绿帘石含量(24.56%)相对增加, 其他矿物组成与拉林河和第二松花江类似。

嫩江支流样品中绿帘石(25.86%~57.89%)为优势矿物,角闪石含量(5.14%~14.59%)显著减少。阿伦河、甘河和多布库尔河的钛铁矿含量显著高于其他河流(11.73%~22.76%);甘河、多布库尔河和雅鲁河的赤/褐铁矿较为富集(10.15%~23.19%);诺敏河的辉石含量(27.13%)在整条松花江中最高。

此外,通河T3阶地重矿物组成中优势重矿物为钛铁矿(53.08%~74.42%),白钛石(0.78%~11.89%)和锆石(1.43%~3.85%)次之,角闪石(0%)与绿帘石含量(0%~3.01%)显著下降。

TIMA检测出更丰富的矿物相,共有39种(图3)。为便于与人工(光学)结果进行比较,将相同类别的矿物进行合并(表2)。TIMA的重矿物检测结果与人工具有很大的相似性,整体矿物含量变化趋势一致,但未检测出锐钛矿和赤/褐铁矿。偶见矿物包括独居石、十字石、硅铁矿、秋本石、刚玉、钙铁矿、方解石、橄榄石、氟碳钙铈矿、铁尖晶石、霓石、瓦兹利石和蛇纹石,含量极低。

表2 TIMA鉴定松花江水系矿物分类

Table 2 Mineral classification of the Songhua River water system as identified by TIMA

矿物名称	矿物分类
金红石类	金红石、钛铁金红石
闪石类	角闪石、阳起石、钙镁闪石、红闪石、铝铁钙闪石、直闪石
电气石类	黑电气石、钙镁电气石
石榴子石类	钙铁榴石、钙铝榴石、镁铝榴石
帘石类	绿帘石、褐帘石、黝帘石、红帘石
辉石类	普通辉石、顽火辉石

4 讨论

重矿物在源汇过程中受到一系列物理和化学作用的影响,包括母岩岩性、河流搬运沉积过程和化学风化等^[18]。上述过程可以使重矿物含量及组合发生变化,导致对后续研究产生错误解释。因此,理清重矿物组成影响因素是全面解释重矿物数据的前提。

4.1 人工与TIMA方法对比

人工鉴定耗时费力,且受操作者主观因素和知识储备的影响,不能高效准确地识别重矿物^[45]。为此,很多研究逐渐使用自动化等新技术结合不同的硬件平台实现自动矿物识别研究。常见的自动化

仪器包括拉曼光谱仪^[46]、激光诱导击穿光谱仪^[47-48]、扫描电镜-能谱仪^[49-52]等。拉曼光谱仪与其他自动化仪器相比的优点是能够快速识别多晶型矿物,如二氧化钛氧化物(金红石、板钛矿和锐钛矿)、碳酸钙相(方解石、白云石、文石)、变质石英和长石类型等^[45],但其数据库没有包含丰富的包裹体颗粒,导致发光或荧光效应引起的复杂光谱作用有限,并且不能提供颗粒的颜色或形态(如表面腐蚀)等信息^[41]。基于激光诱导击穿光谱仪的自动化分析目前主要应用于矿物的处理方面,具有快速识别和无需前处理等优点,但由于受到分辨率制约无法实施重矿物的鉴定^[2]。

目前最佳的自动矿物识别方法是基于SEM-EDS的自动矿物识别系统。基于该方法的仪器包括QEMSCAN、TIMA、MLA等^[2,52]。本研究中使用TIMA仪器和人工方法分别获取松花江12个河流样品的信息。与人工方法相比,TIMA方法在鉴定矿物种类方面显示出较大的优势,共检测出39种重矿物,反映了样品中矿物种类的多样性(图3),而人工鉴定结果仅为24种,这是因为TIMA仪器可以根据化学元素含量以及颜色的差别,准确区分重矿物的不同类型,如闪石类包括角闪石、直闪石、钙镁闪石、红闪石、阳起石等;帘石类包含绿帘石、褐帘石、黝帘石等;石榴子石类包括钙铁榴石、钙铝榴石等(表2)。在重矿物组成方面,TIMA与人工得出几乎相同的重矿物组成,但仍有一些结果存在差异。相较于人工方法(0~0.06%),TIMA鉴定出的金红石含量(0.26%~3.50%)明显更高(表1)。产生此现象的原因可能是在进行重矿物分析时,样品受倾倒影响导致密度大的颗粒优先被倒出,致使两种检测方法得到的结果存在差异^[51]。但本研究皆在同一样品的基础上进行实验,不存在样品倾倒顺序影响。因此,致密颗粒不会富集在用于TIMA分析的样品中。此外,在前人的研究中证实基于SEM-EDS的QEMSCAN仪器无法区分金红石和锐钛矿等多晶型矿物,导致鉴定出的金红石含量偏高^[51]。本研究中TIMA未能识别出锐钛矿,结合相对高的金红石含量,说明TIMA无法识别同质异相的矿物(如金红石和其他TiO₂的矿物),但是人工可以将其区分。除此之外,TIMA鉴定结果中赤/褐铁矿的含量为0,说明TIMA无法识别化学成分接近但属于不同种类的矿物,但专业技术人员可以通过矿物的光学特性将其区分。

总之,人工鉴定方法优点是能够更加精确地获取样品颗粒的表面特征,如形态、颜色和磨损程度

等; 缺点则是工作效率低、检测结果有限, 依赖鉴定者的主观性和经验。然而, TIMA 具有自动化、高分辨率、多颗粒和高精度等特点, 检测结果更加多样化, 并且可以提供额外的信息: 如 BSE 图、元素图、相图等有助于区分样品内部和样品间的变化。此外, TIMA 能够提供更加准确的矿物丰度估计、识别特定矿物粒度, 以便分析矿物富集的粒度组分^[43]。同时, TIMA 可以自动识别结块矿物, 不受颗粒重叠影响^[50]。但 TIMA 不能识别同质异相和多晶型矿物, 而人工方法具有可行性。因此通过对比两种方法的优点和局限性, 说明 TIMA 不能完全取代人工方法, 两者应相互结合, 得到互补的信息。

4.2 物源对重矿物组成的影响

源区母岩类型是影响重矿物组成的控制因素^[53]。重矿物可以参与其他一些碎屑物质的产生、搬运乃至沉积的全部过程, 能够较好地保留其母岩特性^[54-55]。相同或相似的重矿物组合可以指示相同的母岩区, 为判别物源区位置、沉积和构造活动提供线索^[56]。一般来说, 母岩为酸性岩浆岩的区域富集晶型完好的锆石、电气石、独居石、磷灰石和锡石等, 楷石是中酸性火成岩的标志矿物; 中性及基性火成岩中含有磁铁矿、钛铁矿、辉石、白钛石以及角闪石; 钛铁矿、赤铁矿和褐铁矿是花岗岩风化的产物; 蓝晶石、绿帘石和石榴子石是变质岩的标志; 沉积岩中富含金红石、尖晶石和电气石; 锆石则普遍存在于岩浆岩、变质岩和沉积岩等各种类型岩石中, 性质稳定, 其磨圆度常表示物源搬运的相对距离^[57-58]。

在物源不同的碎屑沉积物中, 重矿物会形成独特的组成特征^[59]。松嫩平原水系沉积物主要有 3 个物源, 即西北方向的大兴安岭、东南方向的长白山余脉和东北方向的小兴安岭。松嫩平原周围山地岩性以火成岩为主, 约占 80% 以上^[33]; 大兴安岭的源岩属性主要以花岗岩、中酸性火成岩为主, 含少量玄武岩和辉绿岩等基性岩^[60]; 小兴安岭、长白山和张广才岭的母岩岩性以花岗岩、混合花岗岩、玄武岩和变质岩为主(图 2)^[61]。两种方法鉴定结果均表明, 具有不同物源区(大兴安岭、小兴安岭和长白山余脉)的支流有明显不同的重矿物组成(表 1), 角闪石、榍石、绿帘石、白钛石、辉石、钛铁矿和赤/褐铁矿是区分不同源区水系的指示性矿物。例如, 大兴安岭河流(阿伦河、诺敏河、甘河、多布库尔河和雅鲁河)具有非常高的绿帘石(>25%)和非常低的角闪石(<15%)以及适度高的白钛石含量(>1.8%),

而小兴安岭河流(巴兰河和岔林河)具有很高含量的榍石(>20%)。另外, 辉石含量极高的诺敏河(>27%)、高含量钛铁矿的阿伦河(>11%)、甘河(>19%)和多布库尔河(>22%)以及赤/褐铁矿含量极高的甘河(>23%)、多布库尔河(>12%)和雅鲁河(>10%), 表明了大兴安岭基性火成岩对河流重矿物组成的控制。这些河流上游流经大片出露的玄武岩台地以及河床中大量出现的玄武岩和辉绿岩砾石支持了本文的解释。

尽管松嫩平原周围山体母岩以中酸性岩浆岩为主, 但局部出露的基性岩以及其他变质岩和沉积岩使得流经不同母岩区的支流具有显著不同的重矿物组成, 这很好地体现了重矿物组成的母岩控制。

4.3 河流搬运过程对重矿物组成的影响

在河流搬运沉积过程中, 随着搬运时间和距离的增加, 不稳定重矿物含量逐渐减少, 从而导致重矿物组成发生变化^[62]。但前人对河流搬运过程是否对重矿物组成产生影响这一问题存在争议^[63-64]。

玄武岩和辉绿岩等基性岩出现在诺敏河上游, 源区母岩的侵蚀给诺敏河贡献了大量的基性碎屑物质, 导致诺敏河河床出现大量的玄武岩和辉绿岩砾石堆积以及沉积物中极高含量的辉石。但在嫩江干流和松花江干流, 辉石含量显著降到低值(<5%)。同样的现象也出现在大兴安岭其他河流, 例如, 大兴安岭河流显著富集钛铁矿(阿伦河、甘河和多布库尔河)和赤/褐铁矿(甘河、多布库尔河和雅鲁河), 但在嫩江干流和松花江干流, 这两种矿物的含量很低(表 1)。另外, 需要指出的是, 小兴安岭母岩信息也可以通过嫩江左岸支流(例如讷谟尔河)进入嫩江和松花江干流。小兴安岭母岩具有很高含量的榍石(20%~30%), 但它在嫩江和松花江干流中的含量却很低(<5%)。这种支流与干流重矿物不匹配的现象表明了物源对重矿物组成的控制受到河流过程影响。在河流长距离搬运过程中, 不同物源和浓度的重矿物经过混合和由此产生的稀释作用以及其他因素(比如矿物在源-汇路线中有有限的搬运距离), 使得经过长距离搬运的沉积物携带的源区母岩信息已变得十分模糊。

松花江上游沉积物主要接受松嫩平原西北的大兴安岭和东南的长白山余脉的碎屑贡献(图 1), 这在重矿物组成中得到印证。松花江上游的重矿物组成介于大兴安岭河流和长白山余脉河流之间, 但显著偏向于长白山余脉河流(第二松花江和拉林河)。具体而言, 大兴安岭河流显著高含量的绿帘

石、钛铁矿和赤/褐铁矿受到长白山余脉河流的稀释;而显著低含量的角闪石得到第二松花江和拉林河的补充(表 1),最终得到松花江上游的重矿物组成。但是,从大部分指示性矿物(例如角闪石、榍石、白钛石、辉石、钛铁矿和赤/褐铁矿)来看,松花江上游重矿物组成更接近长白山余脉河流(表 1)。这个结果表明,松花江上游更多接受了来自长白山的重矿物信号,而大兴安岭信号在这里已经变得十分微弱。

因此,碎屑重矿物在经历长距离搬运过程之后,下游的重矿物组成已不能全面反映源区母岩的真实信息。在重矿物源-汇追踪研究中,必须考虑河流搬运过程对重矿物组成的影响。

4.4 化学风化作用对重矿物组成的影响

化学风化作用贯穿于沉积物从源到汇的全过程(剥蚀、搬运、沉积和再暴露)^[65]。在物质来源大致相同的前提下,不同程度的化学风化作用可以产生不同的重矿物组成^[53]。中至高度化学风化作用使稳定矿物在沉积物中显著富集,不稳定矿物强烈

溶解^[2];较弱的化学风化作用则产生相反的现象。一般情况下,锆石、电气石、石榴石、磁铁矿和钛铁矿等矿物的化学性质稳定,耐磨蚀,抗风化性较强;不稳定的闪石类和辉石类矿物受风化作用影响较大^[66]。

河流阶地作为河流系统变迁保留下来的阶梯状地貌,记录了大量的地质信息^[67]。因此,河流阶地的沉积物可以被用来重建地貌演变过程、古水系演化和源-汇关系^[68]。通河 T3 阶地的不稳定矿物辉石和角闪石完全消失,磷灰石和榍石较少出现,钛铁矿含量占优,锆石、石榴子石和白钛石等稳定矿物含量同样呈上升趋势(表 1)。根据先前的研究^[32],通河 T3 阶地沉积物遭受了强烈的化学风化,化学蚀变指数 CIA 高达 85。相较于化学风化程度偏低(CIA=63)的岔林河和蚂蚁河以及松花江,通河 T3 阶地的矿物多样性明显减少。可见,相对于现代河流,河流阶地的重矿物组成已发生重大改变,化学风化作用对通河 T3 阶地重矿物组成产生了显著影响。另一方面,ZTR 指数(锆石 %+电气石 %+金红石 %)即矿物的成熟度,可以作为指示风化程度的指标^[69-70]。稳定系数((W=(极稳定矿物 %+稳定

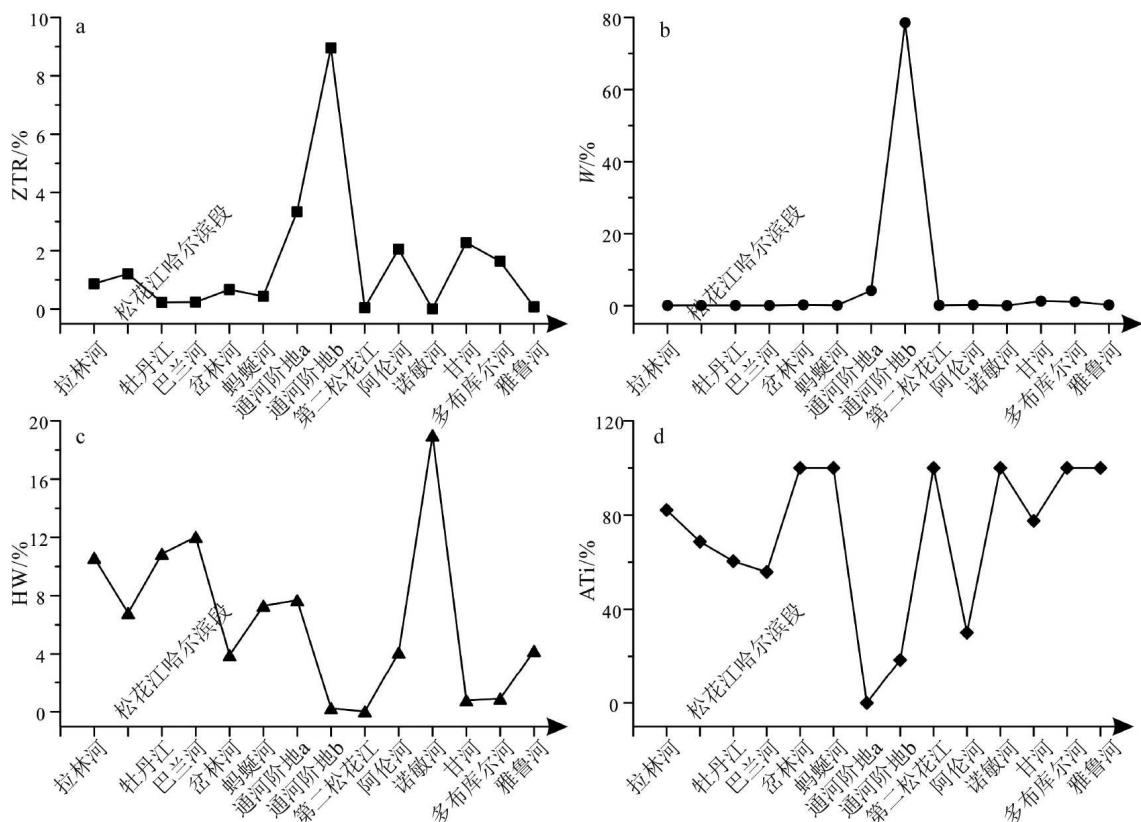


图 4 松花江水系重矿物特征指数

a. ZTR 指数, b. 稳定系数 (W), c. 风化系数 (HW), d. ATI 指数。

Fig.4 Heavy mineral characteristic index of the Songhua River system

with (a) ZTR Index, (b) Stability coefficient (W), (c) Weathering coefficient (HW), and (d) ATI Index.

矿物 %)/(较稳定矿物 %+ 不稳定矿物 %)) 和风化系数 (HW=(较稳定矿物 %+ 不稳定矿物 %)/(极稳定矿物 %+ 稳定矿物 %)) 可以进一步反映沉积物受到的风化作用程度^[71-72]。稳定系数 (W) 越高, 风化程度越强^[73]; 风化系数 (HW) 则与之相反。ATi 指数 (磷灰石/(磷灰石+电气石))×100 能够揭示沉积物中磷灰石的风化程度, 指数越大, 说明风化程度越弱^[74]。通河 T3 阶地的 ZTR 指数和稳定系数 (W) 显著高于其他河流, ATi 指数和风化系数 (HW) 变化与之相反(图 4), 进一步说明该阶地遭受了强烈的化学风化作用。

另外, 埋藏成岩作用也是影响重矿物组成较大的地质过程, 并且影响更加深远^[2]。一般随着时间和深度的增加, 由于孔隙流体温度的升高和孔隙流体成分的变化, 矿物颗粒表面存在溶蚀现象, 不稳定重矿物容易发生溶解甚至消失, 重矿物的多样性逐渐减少^[75-78]。本文中通河 T3 阶地采集样品的深度均小于 200 m 且年龄较轻^[32], 说明该阶地受到埋藏成岩作用影响有限, 化学风化作用为主导因素。

因此, 认为在利用河流阶地沉积物的重矿物组成进行源-汇物源示踪和古水系演化研究时, 需要首先对阶地沉积物的化学风化程度进行有效评估, 只有那些没有明显受到化学风化影响的河流阶地的重矿物组成才能真实反映当时的物源信息。

5 结论

(1) 人工与 TIMA 技术对比表明, 人工鉴定能够更加精确地获取矿物的表面特征, 但耗时费力, 依赖鉴定者的主观判断, 鉴定矿物相有限; TIMA 技术具有速率快、自动化、分辨率高等特点, 鉴定矿物种类更加多样化, 但是对同质异相和多晶型矿物识别较差。因此通过两种技术手段相结合的方法可以使所获信息更加全面。

(2) 不同物源区的支流形成的重矿物组成不同, 表明河流沉积物的重矿物组成受控于源区母岩类型。角闪石、榍石、绿帘石、白钛石、辉石、钛铁矿和赤/褐铁矿是区分各支流的特征矿物, 嫩江支流诺敏河显著高的辉石, 甘河、多布库尔河和阿伦河的高钛铁矿, 甘河、多布库尔河和雅鲁河的高赤/褐铁矿含量揭示了局部基性母岩对重矿物组成的控制。

(3) 大、小兴安岭的重矿物组成特征, 例如大兴安岭显著富集的钛铁矿(甘河、多布库尔河和阿伦河)、赤/褐铁矿(甘河、多布库尔河和雅鲁河)和辉石(诺敏河), 以及小兴安岭的高榍石含量等, 在松

花江干流已显得相当模糊。松花江上游的重矿物组成显示其更多地继承了长白山余脉的重矿物信息。上述现象表明, 物源对重矿物组成的控制受河流过程的限制, 使大兴安岭源区母岩信息在松花江干流显著减弱。

(4) 相对于现代河流沉积物, 通河 T3 阶地的不稳定造岩矿物辉石和角闪石已完全消失, 磷灰石和榍石强烈溶解, 稳定矿物(钛铁矿、锆石、石榴子石和白钛石)显著富集, 表明沉积物遭受了强烈的化学风化, 重矿物组成以及母岩信息已严重被影响。因此, 在利用重矿物进行源-汇过程研究时, 要注意化学风化作用对阶地沉积物的影响。

致谢: 河北廊坊诚信、诚谱地质公司的张晏子、李鹏、王根涛、张佩萱和张云丹等做了大量的样品测试工作, 魏振宇、赵倩、刘硕和孙杨参加了松花江水系的部分野外取样, 候心茹、徐园园、孙建华、魏春艳、冷宇坤、汪进秋和张瑞参加了松花江水系沉积物重矿物的试验样品前处理工作, 在此一并表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] 曾方侶, 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): 26-29,50. [ZENG Fanglü, JIANG Kai, HUANG Chao, et al. Genetic significance of heavy minerals in sandstone [J]. Acta Geologica Sichuan, 2020, 40(1): 26-29,50.]
- [2] 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.]
- [3] 王国茹, 陈洪德, 朱志军, 等. 川东南-湘西地区志留系小河坝组砂岩中重矿物特征及地质意义 [J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2011, 38(1): 7-14. [WANG Guoru, CHEN Hongde, ZHU Zhijun, et al. Characteristics and geological implications of heavy minerals in Lower Silurian Xiaoheba Formation sandstones in Southeast Sichuan-West Hunan [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2011, 38(1): 7-14.]
- [4] 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.]
- [5] 周国华, 孙彬彬, 刘占元, 等. 中国东部主要河流稀土元素地球化学特征 [J]. 现代地质, 2012, 26(5): 1028-1042. [ZHOU Guohua, SUN Binbin, LIU Zhanyuan, et al. Geochemical feature of rare earth elements in major rivers of eastern China [J]. Geoscience, 2012, 26(5): 1028-1042.]

- [6] Singh P, Rajamani V. REE geochemistry of recent clastic sediments from the Kaveri floodplains, southern India: Implication to source area weathering and sedimentary processes [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(18): 3093-3108.
- [7] Tripathi J K, Ghazanfari P, Rajamani V, et al. Geochemistry of sediments of the Ganges alluvial plains: evidence of large-scale sediment recycling [J]. *Quaternary International*, 2007, 159(1): 119-130.
- [8] 童胜琪, 刘志飞, Le K P, 等. 红河盆地的化学风化作用: 主要和微量元素地球化学记录[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2006, 25(3): 218-225. [TONG Shengqi, LIU Zhifei, Le K P, et al. Chemical weathering in the Red River Basin: records of major and trace elemental geochemistry [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2006, 25(3): 218-225.]
- [9] 刘文, 徐士进, 杨杰东, 等. 金沙江河流悬浮物与沉积物的矿物学特征及其表生地球化学意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2007, 26(2): 164-169. [LIU Wen, XU Shijin, YANG Jiedong, et al. Mineralogical characteristics of suspended matters and sediments in the Jinshajiang River and their superficial geochemical significance [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2007, 26(2): 164-169.]
- [10] 周天琪, 吴朝东, 袁波, 等. 准噶尔盆地南缘侏罗系重矿物特征及其物源指示意义[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 65-78. [ZHOU Tianqi, WU Chaodong, YUAN Bo, et al. New insights into multiple provenances evolution of the Jurassic from heavy minerals characteristics in southern Junggar Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(1): 65-78.]
- [11] Song H Y, Liu J Q, Yin P, et al. Characteristics of heavy minerals and quantitative provenance identification of sediments from the muddy area outside the Oujiang estuary since 5.8 kyr [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2018, 17(6): 1325-1335.
- [12] 武法东, 陆永潮, 阮小燕, 等. 重矿物聚类分析在物源分析及地层对比中的应用: 以东海陆架盆地西湖凹陷平湖地区为例[J]. 现代地质, 1996, 10(3): 106-112. [WU Fadong, LU Yongchao, RUAN Xiaoyan, et al. Application of heavy minerals cluster analysis to study of clastic sources and stratigraphic correlation [J]. *Geoscience*, 1996, 10(3): 106-112.]
- [13] Herbig H G, Stattegger K. Late Palaeozoic heavy mineral and clast modes from the Betic Cordillera (southern Spain): transition from a passive to an active continental margin [J]. *Sedimentary Geology*, 1989, 63(1-2): 93-108.
- [14] 冉波, 王成善, 朱利东, 等. 距今40~30Ma时期青藏高原北缘酒西盆地沉积物重矿物分析和构造意义[J]. *地学前缘*, 2008, 15(5): 388-397. [RAN Bo, WANG Chengshan, ZHU Lidong, et al. Analysis of heavy minerals in sediments of Jiuxi Basin in north margin of the Tibet plateau in 40-30 Ma and its tectonic implication [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(5): 388-397.]
- [15] 宋春晖, 孙淑荣, 方小敏, 等. 酒西盆地晚新生代沉积物重矿物分析与高原北部隆升[J]. *沉积学报*, 2002, 20(4): 552-559. [SONG Chunhui, SUN Shurong, FANG Xiaomin, et al. Analysis of tectonic uplift and heavy minerals of sediments on Jiuxi Basin in the northern margin of Tibetan Plateau since the late Cenozoic [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(4): 552-559.]
- [16] 方世虎, 郭召杰, 贾承造, 等. 准噶尔盆地南缘中-新生界沉积物重矿物分析与盆山格局演化[J]. *地质科学*, 2006, 41(4): 648-662. [FANG Shihu, GUO Zhaojie, JIA Chengzao, et al. Meso-cenozoic heavy minerals' assemblages in the southern Junggar Basin and its implications for basin-orogen pattern [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2006, 41(4): 648-662.]
- [17] 赵雪松, 高志勇, 冯佳睿, 等. 库车前陆盆地三叠系: 新近系重矿物组合特征与盆山构造演化关系[J]. 沉积学报, 2014, 32(1): 68-77. [ZHAO Xuesong, GAO Zhiyong, FENG Jiarui, et al. Triassic-neogene heavy minerals' assemblages characteristics and Basin-Orogen tectonic evolution relationship in the Kuqa Foreland Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(1): 68-77.]
- [18] Cheng L Q, Song Y G, Chang H, et al. Heavy mineral assemblages and sedimentation rates of eastern Central Asian loess: paleoenvironmental implications [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 551: 109747.
- [19] 中国地质科学院地矿所. 砂矿物鉴定手册[M]. 北京: 地质出版社, 1977 [Chinese Academy of Geological Sciences. Handbook of Sand Mineral Identification[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1977.]
- [20] 谢小敏, 李利, 袁秋云, 等. 应用TIMA分析技术研究Alum页岩有机质和黄铁矿粒度分布及沉积环境特征[J]. 岩矿测试, 2021, 40(1): 50-60. [XIE Xiaomin, LI Li, YUAN Qiuyun, et al. Grain size distribution of organic matter and pyrite in Alum shales characterized by TIMA and its paleo-environmental significance [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2021, 40(1): 50-60.]
- [21] 陈倩, 宋文磊, 杨金昆, 等. 矿物自动定量分析系统的基本原理及其在岩矿研究中的应用: 以捷克泰思肯公司TIMA为例[J]. 矿床地质, 2021, 40(2): 345-368. [CHEN Qian, SONG Wenlei, YANG Jinkun, et al. Principle of automated mineral quantitative analysis system and its application in petrology and mineralogy: an example from TESCAN TIMA [J]. *Mineral Deposits*, 2021, 40(2): 345-368.]
- [22] Sutherland D N, Gottlieb P. Application of automated quantitative mineralogy in mineral processing [J]. *Minerals Engineering*, 1991, 4(7-11): 753-762.
- [23] Haberlah D, Williams M A J, Halverson G, et al. Loess and floods: high-resolution multi-proxy data of Last Glacial Maximum (LGM) slackwater deposition in the Flinders Ranges, semi-arid South Australia [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(19-20): 2673-2693.
- [24] Martin R S, Mather T A, Pyle D M, et al. Composition - resolved size distributions of volcanic aerosols in the Mt. Etna plumes [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D17): D17211.
- [25] Speirs J C, McGowan H A, Neil D T. Polar eolian sand transport: grain characteristics determined by an automated scanning electron microscope (QEMSCAN®) [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2008, 40(4): 731-743.
- [26] Meyer M C, Austin P, Tropper P. Quantitative evaluation of mineral grains using automated SEM-EDS analysis and its application potential in optically stimulated luminescence dating [J]. *Radiation Measurements*, 2013, 58: 1-11.
- [27] 孙白云. 黄河、长江和珠江三角洲沉积物中碎屑矿物的组合特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1990, 10(3): 23-34. [SUN Baiyun. Detrital mineral assemblages in the Huanghe, Changjiang and Zhujiang

- River delta sediments [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1990, 10(3): 23-34.]
- [28] 邵磊, 李长安, 张玉芬, 等. 长江川江段现代沉积物的重矿物组合特征[J]. *地质科技情报*, 2010, 29(3): 49-54. [SHAO Lei, LI Chang'an, ZHANG Yufen, et al. Heavy mineral assemblages in modern sediments of the Chuanjiang River [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2010, 29(3): 49-54.]
- [29] 李维东. 黄河上游晚新生代沉积物的物源分析与河流演化[D]. 中国地质科学院博士学位论文, 2020 [LI Weidong. Provenance analysis of the Late Cenozoic sediment of the Upper Yellow River and its evolution [D]. Doctor Dissertation of Chinese Academy of Geological Sciences, 2020.]
- [30] 王嘉新, 谢远云, 康春国, 等. 哈尔滨荒山岩芯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.]
- [31] 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.]
- [32] 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.
- [33] 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 of some elements in the main rock types of the Songhua River basin in Heilongjiang Province and their environmental significance [J]. *Natural Science Journal of Harbin Normal University*, 1986(4): 113-121.]
- [34] 张玉娟, 赵鹤, 钟浩. 松花江流域(哈尔滨段)景观格局脆弱性高程分异[J]. *测绘与空间地理信息*, 2020, 43(5): 11-15, 18. [ZHANG Yujuan, ZHAO He, ZHONG Hao. Elevation differentiation of landscape pattern vulnerability in Songhua River Basin (Harbin Section) [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2020, 43(5): 11-15, 18.]
- [35] 董爱民. 松花江流域地势图晕渲配色方案及优化[J]. 北京测绘, 2021, 35(7): 981-985. [DONG Aimin. Color scheme and optimization of shading in relief map of Songhua River Basin [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2021, 35(7): 981-985.]
- [36] 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 detention basin construction in Songhuajiang river basin [J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2007, 25(10): 31-33.]
- [37] Wu F Y, Yang J H, Lo C H, et al. The Heilongjiang Group: a Jurassic accretionary complex in the Jiamusi Massif at the western Pacific margin of northeastern China [J]. *Island Arc*, 2007, 16(1): 156-172.
- [38] 付俊彧, 朱群, 杨雅军, 等. 中华人民共和国(东北)地质图(1:1500000) [M]. 北京: 地质出版社, 2019: 1-147. [FU Junyu, ZHU Qun, YANG Yajun, et al. Geological map of the People's Republic of China (Northeast) (1: 1500000) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 1-147.]
- [39] 韩梅, 梁贞堂. 关于松花江河源的再研究[J]. *水利水电技术*, 2004, 35(12): 10-14, 27. [HAN Mei, LIANG Zhentang. Another investigation for the source of Songhua River [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2004, 35(12): 10-14, 27.]
- [40] 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.]
- [41] 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.]
- [42] 康春国, 李长安, 谢远云, 等. 哈尔滨地区风尘黄土重矿物特征及物源分析[J]. *自然灾害学报*, 2011, 20(4): 43-51. [KANG Chunguo, LI Chang'an, XIE Yuanyun, et al. Heavy mineral characteristics of eolian loess deposits in Harbin area and its provenance implications [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20(4): 43-51.]
- [43] Ward I, Merigot K, McInnes B I A. Application of quantitative mineralogical analysis in archaeological micromorphology: a case study from barrow is., western Australia [J]. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 2018, 25(1): 45-68.
- [44] Yue W, Yue X Y, Zhang L M, et al. Morphology of detrital zircon as a fingerprint to trace sediment provenance: case study of the Yangtze delta [J]. *Minerals*, 2019, 9(7): 438.
- [45] Dunkl I, von Eynatten H, Andò S, et al. Comparability of heavy mineral data: the first interlaboratory round robin test [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 211: 103210.
- [46] Ishikawa S T, Gulick V C. An automated mineral classifier using Raman spectra [J]. *Computers & Geosciences*, 2013, 54: 259-268.
- [47] Haddad J E, de Lima Filho E S, Vanier F, et al. Multiphase mineral identification and quantification by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Minerals Engineering*, 2019, 134: 281-290.
- [48] Rifai K, Paradis M M, Swierczek Z, et al. Emergences of new technology for ultrafast automated mineral phase identification and quantitative analysis using the CORIOSITY laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) system [J]. *Minerals*, 2020, 10(10): 918.
- [49] Gu Y. Automated scanning electron microscope based mineral liberation analysis *an introduction to JKMR/FEI mineral liberation analyzer* [J]. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 2003, 2(1): 33-41.
- [50] Hrstka T, Gottlieb P, Skála R, et al. Automated mineralogy and petrology-applications of TESCAN Integrated Mineral Analyzer (TIMA) [J]. *Journal of Geosciences*, 2018, 63(1): 47-63.
- [51] Zhang X J, Pease V, Omma J, et al. Provenance of Late Carboniferous

- to Jurassic sandstones for southern Taimyr, Arctic Russia: a comparison of heavy mineral analysis by optical and QEMSCAN methods [J]. *Sedimentary Geology*, 2015, 329: 166-176.
- [52] Schulz B, Sandmann D, Gilbricht S. SEM-based automated mineralogy and its application in geo- and material sciences [J]. *Minerals*, 2020, 10(11): 1004.
- [53] 狄会哲, 邓宾, 赵高平, 等. 云贵高原河流水系演化与高原形成过程: 基于现代河流沉积物示踪[J]. *四川地质学报*, 2018, 38(4): 536-541. [DI Huizhe, DENG Bin, ZHAO Gaoping, et al. The evolution of the river system on the Yunnan-Guizhou Plateau and formation process of the plateau based on modern river sediment [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2018, 38(4): 536-541.]
- [54] Nie J S, Peng W B, Pfaff K, et al. Controlling factors on heavy mineral assemblages in Chinese loess and Red Clay [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 381-382: 110-118.
- [55] 和钟铧, 刘招君, 张峰. 重矿物在盆地分析中的应用研究进展[J]. *地质科技情报*, 2001, 20(4): 29-32. [HE Zhonghua, LIU Zhaojun, ZHANG Feng. Latest progress of heavy mineral research in the basin analysis [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2001, 20(4): 29-32.]
- [56] 赵红格, 刘池洋. 物源分析方法及研究进展[J]. *沉积学报*, 2003, 21(3): 409-415. [ZHAO Hongge, LIU Chiyang. Approaches and prospects of provenance analysis [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(3): 409-415.]
- [57] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 4版. 北京: 石油工业出版社, 2008: 90-105. [ZHU Xiaomin. *Sedimentary Petrology* [M]. 4th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 90-105.]
- [58] 康春国, 李长安, 邵磊. 江汉平原主要河流沉积物重矿物特征与物源区岩性的响应[J]. *第四纪研究*, 2009, 29(2): 334-342. [KANG Chunguo, LI Chang'an, SHAO Lei. Heavy mineral characteristics of river sediments in Jianghan Plain and its response to provenance rock types [J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(2): 334-342.]
- [59] 胡鹏, 鲍志东, 于兴河, 等. 碎屑重矿物差异与物源演化: 以长岭凹陷乾北地区青三段-姚一段为例[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(2): 375-387. [HU Peng, BAO Zhidong, YU Xinghe, et al. Detrital heavy mineral difference and its implication for provenance: a case study of the third member of Qingshankou formation and the first member of Yaojia formation in Qianbei area, Changling sag [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(2): 375-387.]
- [60] 蔡芃睿, 王涛, 王宗起, 等. 大兴安岭中段乐平统-中三叠统沉积物分析: 来自重矿物组合及碎屑锆石年代学证据[J]. *岩石学报*, 2019, 35(11): 3549-3564. [CAI Pengrui, WANG Tao, WANG Zongqi, et al. Lopingian to Middle Triassic provenance analysis of sedimentary rocks in the middle segment of the Da Hinggan Mountains: evidence from the heavy mineral assemblage and the detrital zircon U-Pb ages [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(11): 3549-3564.]
- [61] 马丽芳. 中国地质图集[M]. 北京: 地质出版社, 2002 [MA Lifang. *Geological Atlas of China* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.]
- [62] 和钟铧, 刘招君, 郭巍. 柴达木盆地北缘大煤沟剖面重矿物分析及其地质意义[J]. *世界地质*, 2001, 20(3): 279-284,312. [HE Zhonghua, DU Yan, LIU Zhaojun, ZHANG Feng. Heavy mineral analysis and its geological significance of Dameigou section in northern Caidam Basin [J]. *World Geology*, 2001, 20(3): 279-284,312.]
- [63] 苗小龙, 杜燕. 与胡修棉的讨论: 水流搬运与沉积过程中掺和作用对碎屑颗粒的重要影响[J]. *古地理学报*, 2017, 19(4): 648-652. [MIAO Xiaolong, DU Yan. Discussion with Hu: significant influence of mixing action to clastic particles during the process of flowing transportation and sedimentation [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(4): 648-652.]
- [64] 胡修棉. 物源分析的一个误区: 砂粒在河流搬运过程中的变化[J]. *古地理学报*, 2017, 19(1): 175-184. [HU Xiumian. A misunderstanding in provenance analysis: sand changes of mineral, roundness, and size in flowing-water transportation [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(1): 175-184.]
- [65] Morton A C, Hallsworth C. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones [J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90(3-4): 241-256.
- [66] Morton A C, Hallsworth C. Chapter 7 stability of detrital heavy minerals during burial diagenesis [J]. *Developments in Sedimentology*, 2007, 58: 215-245.
- [67] 蒋玺, 陈文奇, 宁凡, 等. 贵州高原北部河流阶地发育与喀斯特地貌演化[J]. *地理研究*, 2021, 40(1): 81-92. [JIANG Xi, CHEN Wenqi, NING Fan, et al. River terraces in the northern Guizhou Plateau and their implications for karst landform evolution [J]. *Geographical Research*, 2021, 40(1): 81-92.]
- [68] 董铭, 苏怀, 史正涛, 等. 金沙江金江街段河流阶地年代及对河谷水系演化历史的启示[J]. *地理学报*, 2018, 73(9): 1728-1736. [DONG Ming, SU Huai, SHI Zhengtao, et al. The age of river terraces in the Jinjiangjie reach of the Jinsha River and its implications for valley and drainage evolution [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(9): 1728-1736.]
- [69] 陆洁民, 郭召杰, 赵泽辉, 等. 新生代酒西盆地沉积特征及其与祁连山隆升关系的研究[J]. *高校地质学报*, 2004, 10(1): 50-61. [LU Jiemin, GUO Zhaojie, ZHAO Zehui, et al. Cenozoic sedimentation characteristics of Jiuxi Basin and uplift history of northern Qilian Mountain [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2004, 10(1): 50-61.]
- [70] 程岩, 刘月, 李富祥, 等. 鸭绿江口及邻近浅海碎屑矿物特征与物源辨识[J]. *地理研究*, 2010, 29(11): 1950-1960. [CHENG Yan, LIU Yue, LI Fuxiang, et al. Detrital mineral characteristics and material source identification in surface sediments of Yalu River estuary and adjacent waters [J]. *Geographical Research*, 2010, 29(11): 1950-1960.]
- [71] 牛东风, 李保生, 王丰年, 等. 不同沉积相重矿物组成及其对气候的指示: 以米浪沟湾全新统MGS1层段为例[J]. *实验室研究与探索*, 2015, 34(7): 7-11. [NIU Dongfeng, LI Baosheng, WANG Fengnian, et al. Heavy mineral composition and its climatic indication for the MGS1 Segment in the holocene in Milanggouwan [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2015, 34(7): 7-11.]
- [72] 李艳, 李安春, 黄朋. 大连湾近海表层沉积物重矿物组合分布特征及其物源环境指示[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(6): 13-20. [LI Yan, LI Anchun, HUANG Peng. Distribution of heavy mineral as-

- semblages in subsurface sediments of Dalian bay and their implications for provenance and environment [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(6): 13-20.]
- [73] 马婉仙. 重砂测量与分析[M]. 北京: 地质出版社, 1990 [MA Wanxian. Heavy Sand Measurement and Analysis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990.]
- [74] 程瑜, 李向前, 赵增玉, 等. 苏北盆地 TZK9 孔磁性地层及重矿物组合特征研究[J]. *地质力学学报*, 2016, 22(4): 994-1003. [CHENG Yu, LI Xiangqian, ZHAO Zengyu, et al. Magnetostratigraphy and heavy minerals records of TZK9 core in Subei Basin [J]. *Journal of Geomechanics*, 2016, 22(4): 994-1003.]
- [75] Milliken K L, Mack L E. Subsurface dissolution of heavy minerals, Frio Formation sandstones of the ancestral Rio Grande Province, South Texas [J]. *Sedimentary Geology*, 1990, 68(3): 187-199.
- [76] 李双建, 石永红, 王清晨. 碎屑重矿物分析对库车坳陷白垩: 第三纪物源变化的指示[J]. *沉积学报*, 2006, 24(1): 28-35. [LI Shuangjian, SHI Yonghong, WANG Qingchen. The analysis of detrital heavy minerals in cretaceous-tertiary sandstones, Kuqa depression and their implications for provenance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(1): 28-35.]
- [77] Smale D, Morton A C. Heavy mineral suites of core samples from the McKee Formation (Eocene-Lower Oligocene), Taranaki: implications for provenance and diagenesis [J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 1987, 30(3): 299-306.
- [78] 李红, 李飞, 龚娇林, 等. 混积岩中重矿物形貌学特征及物源意义: 以川北寒武系第二统仙女洞组为例[J]. *沉积学报*, 2021, 39(3): 525-539. [LI Hong, LI Fei, GONG Qiaolin, et al. Morphological Characteristics and Provenance Significance of Heavy Minerals in the Mixed Siliciclastic-carbonate Sedimentation: a case study from the Xiannüdòng Formation, Cambrian (Series 2), northern Sichuan [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(3): 525-539.]