

doi:10.19509/j.cnki.dzkq.2020.0602

林旭,赵希涛,吴中海,等.渤海湾周缘主要河流钾长石物源示踪指标研究[J].地质科技通报,2020,39(6):10-18.

Lin Xu,Zhao Xitao,Wu Zhonghai,et al. Source tracing elements of K-feldspars of main rivers around Bohai Bay Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology,2020,39(6):10-18.

渤海湾周缘主要河流钾长石物源示踪指标研究

林旭¹,赵希涛²,吴中海³,李长安⁴,刘海金⁵,李兆宁⁶

(1. 三峡大学,湖北宜昌 443002; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029;

3. 中国科学院地质力学研究所,北京 100081; 4. 中国地质大学(武汉),武汉 430074;

5. 东华理工大学,南昌 330013; 6. 中国地震局地质研究所,北京 100029)

摘要:渤海湾盆地碎屑物质的物源示踪研究,对于渤海湾盆地的自身演化,周缘造山带隆升和剥蚀过程,以及中国东部陆架海的物质扩散研究均具有重要意义,受到国内外学者的广泛关注,同时也存在诸多争议。钾长石是地壳中最主要的造岩矿物之一,在河流沉积物中广泛出现,在进行物源示踪研究时具有代表性。基于此,利用激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS)对渤海湾盆地主要注入河流的碎屑钾长石进行了原位地球化学特征分析,结果表明,黄河干流碎屑钾长石的常量元素 Na_2O 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 K_2O 的标准偏差与滦河、滦河、辽河和漳河 4 条河流存在差异。在钾长石常量元素 Al_2O_3 质量分数与 Na_2O 和 K_2O 质量分数二维散点图中,部分黄河样品的 Al_2O_3 值较之整体部分(其他 4 条河流和黄河样品)偏低;微量元素中 Ba、Pb、Sr、Rb 和 Ca 的质量分数占主体部分,尤其 Ba、Pb、Sr、Rb 的含量较高。在 Ba 和 Sr 以及 Ba 和 Pb 质量分数二维散点图中,黄河与其他 4 条河流明显不同。该研究结果表明,钾长石的 Ba 和 Sr 含量变化可以成为环渤海湾盆地沉积物中黄河物源示踪的特征指标。

关键词:渤海湾盆地;黄河;钾长石;元素特征;物源示踪

中图分类号:P554

文章编号:1000-7849(2020)06-0010-09

收稿日期:2019-12-06

Source tracing elements of K-feldspars of main rivers around Bohai Bay Basin

Lin Xu¹, Zhao Xitao², Wu Zhonghai³, Li Chang'an⁴, Liu Haijin⁵, Li Zhaoning⁶

(1. China Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China; 2. Institute of Geology and

Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3. Institute of Geological Mechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

4. China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China;

5. East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

6. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

Abstract: The study on provenance identification of Bohai Bay Basin is great significance to its evolution, the uplift and erosion process of the peripheral orogenic belt, and the material diffusion of the continental shelf sea in eastern China. K-feldspar is one of the most important petrogenic minerals in the earth's crust, which is widely found in the river sediments, being representative in the study of source tracing. After long-distance river transportation, its element characteristics can still well record the information of its

基金项目:国家自然科学基金项目(41702178;41972212);湖南省自然科学基金项目(2019JJ40198)

作者简介:林旭(1984—),男,副教授,主要从事长江和黄河演化与第四纪地质学的科研与教学工作。E-mail:hanwuji-life@163.com

通信作者:李长安(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事长江演化与第四纪地质学的科研与教学工作。E-mail:chanli@cug.edu.cn

source area. Based on these facts, in this study, we rely on the laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) to analyze the geochemical index from the river detrital K-feldspar of the Bohai Bay Basin. The results show that the contents of Na_2O , Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O of K-feldspar grains from the Yellow River are significantly different from the Hutuohe River, Luanhe River, Liaohe River and Zhanghe River. In the two-dimensional scatter diagram of Al_2O_3 , Na_2O and K_2O , the Al_2O_3 value of some Yellow River samples is lower than the others. The contents of Ba, Pb, Sr, Rb and Ca are the main parts of trace elements, especially the first four. In the two-dimensional scatter diagrams of Ba and Sr and Ba and Pb, the Yellow River is obviously different from the other four rivers, which makes it a characteristic river in the study of provenance tracing in the Bohai Bay Basin.

Key words: Bohai Bay Basin; Yellow River; K-feldspar; element characteristics; provenance tracing

大型河流是陆源碎屑物质搬运入海、入盆的主要方式,是建立造山带与大洋、内陆盆地物质联系的纽带^[1-8]。渤海湾盆地位于华北克拉通东部,西接太行山,东到辽河口,北临燕山,南抵鲁西隆起,是典型的板内裂谷盆地^[9-11](图 1)。自中—新生代以来,其周围山脉经历长时间的夷平剥蚀过程,所产生的碎屑物质经河流搬运进入盆地堆积^[13-18]。此外,渤海湾盆地是黄河穿过三门峡东流入海流经的最后一个

构造和沉积盆地^[19-20],因而渤海湾盆地与周边造山带存在近缘与远缘的盆地耦合关系。因此对渤海湾盆地的碎屑物质开展物源示踪研究,不仅可以获知盆地自身的演化序列和地貌演化过程,还可以获取周缘造山带长时间的隆升信息;同时对中国北方三大地势阶梯的时代建立也具有重要的指示意义,可以为中国东部陆架海物质扩散研究提供对比数据。

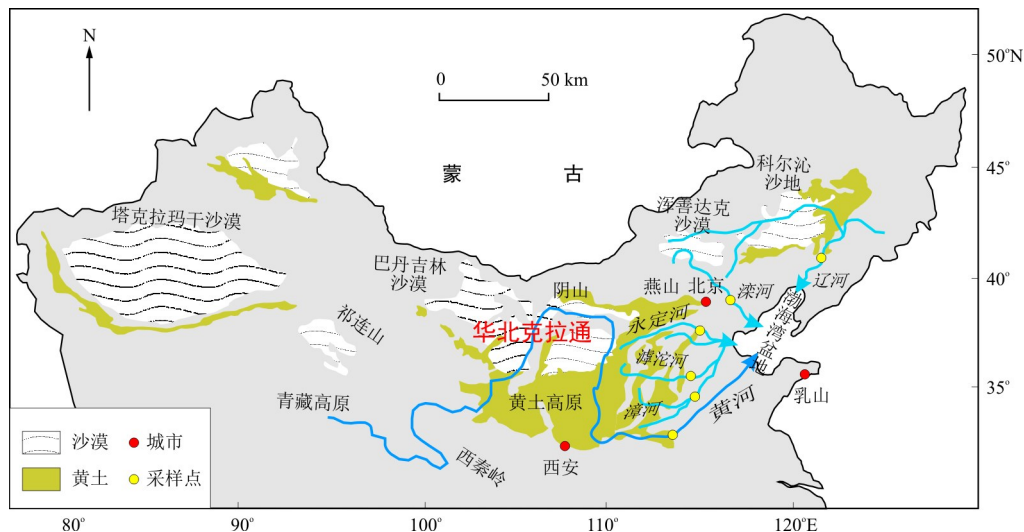


图 1 渤海湾盆地位置示意图(据文献 [12]修改)

Fig. 1 Location diagram of Bohai Bay Basin

国内外学者曾对渤海湾盆地开展了广泛的物源示踪研究。例如,杨守业等^[20]对黄河三角洲钻孔开展了物源示踪分析,结合岩性、粒度分析结果,以及沉积地层时代,认为黄河在早更新世贯通。Nie等^[15]对黄河流域进行了重矿物、碎屑锆石 U-Pb 年龄分析,推断黄河在中更新世将大量碎屑物质搬运到渤海湾盆地。渤海湾西北部钻孔沉积物的稀土元素特征表明,晚更新世以来沉积物主要受燕山水系和太行山水系,以及黄河历史时期频繁流经华北平原的影响^[21]。渤海湾北部海域表层沉积物中辉石类、帘石类、金属类稳定矿物主要来自滦河;角闪石

类、云母类矿物主要物源为海河和黄河^[22]。黄河口和莱州湾内表层沉积物的重矿物组合表明沉积物主要由黄河输入,莱州湾西南部河流和山东半岛西部岛屿冲刷物质为次要来源^[23]。通过提取黄河、辽河和鸭绿江表层沉积物中的角闪石,分析其常量和微量元素组成,结果表明 3 条河流常量元素组成相近,但微量元素组成明显不同,可作为物源识别的判别标志^[24]。渤海湾盆地东部 DLC70-1 钻孔晚更新世以来碎屑物质主要来源于黄河、滦河和海河^[25]。基于碎屑锆石 U-Pb 年龄谱与周缘造山带锆石 U-Pb 年龄对比,确定渤海湾盆地始新统与太行山和燕山

具有物源联系^[26-27]。不难看出,前人对渤海湾盆地与周缘造山带的盆山耦合时间依然没有达成共识。一方面受限于所研究钻孔深度的差异;另一方面在同一研究地点也缺乏多物源示踪指标的交叉检验。尤其对于注入渤海湾盆地的河流汇水面积大,流域内构造历史及岩石类型复杂,盆地内物质多旋回沉积现象常见。因此,在渤海湾盆地开展物源示踪研究,确定沉积物源区以及沉积物进入河流或沉积盆地搬运路径的演变过程,了解源区(源)与沉积区(汇)的相互关系,从而重建流域内构造活动、气候变化与大河演化的耦合性时,选择合适的物源示踪方法就显得尤为重要。

正长石和微斜长石通常都叫作钾长石,它们的化学组成相同($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$),是地壳中最主要的造岩矿物之一,并广泛存在于河流沉积物中,且比较稳定,因而在进行物源示踪研究时更具有代表性^[28-34]。近年来,国内外研究者越来越多地利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)对钾长石开展微区原位(in situ)元素地球化学分析^[29],在大河物质搬运^[30-33]、古流向重建^[34]、成矿环境判定^[35]等方面取得了良好效果。在本次研究中,笔者基于对渤海湾周缘主要注入大河进行的碎屑钾长石常量和微量元素分析,通过寻找它们的异同点,归纳提出相应的物源示踪指标,为其成为渤海湾盆地物源示踪研究的目标矿物提供新的判别依据,进而为研究渤海湾盆地的盆山耦合关系提供新的物源示踪约束。

1 样品来源及分析方法

1.1 样品采集

渤海湾盆地周缘河流水系十分发育,分别由辽河、滦河、滹沱河、漳河以及黄河等主要水系注入,使其成为一个多物源沉积盆地。本次研究主要在辽河、滦河、滹沱河、漳河以及黄河开展样品采集工作,为了避免在河口位置采样受到海水倒灌的影响,造成样品的混染,样品采集地点选择在河流入海口以上的河段,具体的河流水文特征和采样点位置如下。

(1)辽河是渤海湾盆地东部最大的河流,全长 1 390 km,流域面积 219 000 km²;分为东辽河和西辽河,东辽河发源于吉林省东辽县小葱子顶子山东南部,西辽河发源于七老图山和大兴安岭山脉南部,以西辽河为正源。在东西辽河汇合后的台安县红庙子村辽河下游干流采集样品(TA-3, N41°45′05″, E122°48′15″)。

(2)滦河发源于内蒙古丰宁县,全长 833 km,流域面积 44 900 km²,向南流经燕山山脉最后注入渤

海,其主体流动在华北克拉通内,上游部分河段流经中亚造山带南缘。样品 LH-2 采自承德市双滦区三道合村滦河干流(N39°51′04″, E118°49′12″)。

(3)滹沱河发源于山西省繁峙县,全长 587 km,流域面积 27 300 km²,向西南流经恒山与五台山之间,至界河折向东流,切穿系舟山和太行山,东流至河北省献县臧桥与滏阳河相汇成子牙河后入渤海。样品 HTH-1 采自滹沱河下游边滩(N38°10′20″, E114°64′47″)。

(4)漳河发源于山西长治,长约 412 km,流域面积为 18 200 km²,其上游由清漳河和浊漳河组成,二者在河北省涉县合漳村汇合后称为漳河。样品 ZHH-1 采自太行山与华北平原衔接部位的干流边滩(N36°31′49″, E114°08′31″)。

(5)黄河是我国第二大河,也是世界上泥沙含量最高的河流,发源于青海巴颜喀拉山北麓,流经青藏高原、黄土高原和华北平原,东流入渤海,全长 5 464 km,流域面积约 752 443 km²。样品 DM-1 在东明县黄河干流边滩采集(N35°25′26″, E115°07′48″)。

1.2 样品分析

每个采样点采集约 3 kg 的全粒级样品,将样品送至河北省廊坊市河北区域地质调查研究所实验室进行钾长石矿物颗粒挑选。经过磁选与重液分选后,最后在双目镜下将长石与石英区分。每个样品挑选出大于 1 000 粒钾长石颗粒。然后随机挑选出约 300 粒钾长石用环氧树脂将其固定在薄片上,待其凝固后对薄片进行打磨抛光,使钾长石颗粒表面平滑、整洁(图 2)。通过对样品进行透射光和反射光图像观察,了解样品的外部 and 内部结构(如矿物裂隙、矿物蚀变和包裹体等现象),进而为分析过程中测试点位的选择提供可靠的参考。

前期样品制靶以及单矿物原位微区微量元素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICP-MS 完成,每个样品测试 40 颗钾长石,详细的仪器参数和分析流程见文献^[36]。GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPEXPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成,ICP-MS 型号为 Agilent 7700e。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合,激光剥蚀系统配置有信号平滑装置^[37]。本次分析的激光束斑和频率分别为 60 μm 和 5 Hz。单矿物微量元素含量处理中采用玻璃标准物质 BHVO-2G、BCR-2G 和 BIR-1G 进行多外标无内标校正^[38]。每个时间分辨分析数据包括 20~30 s 空白信号和 50 s 样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正以及元素含量计算)采用软件

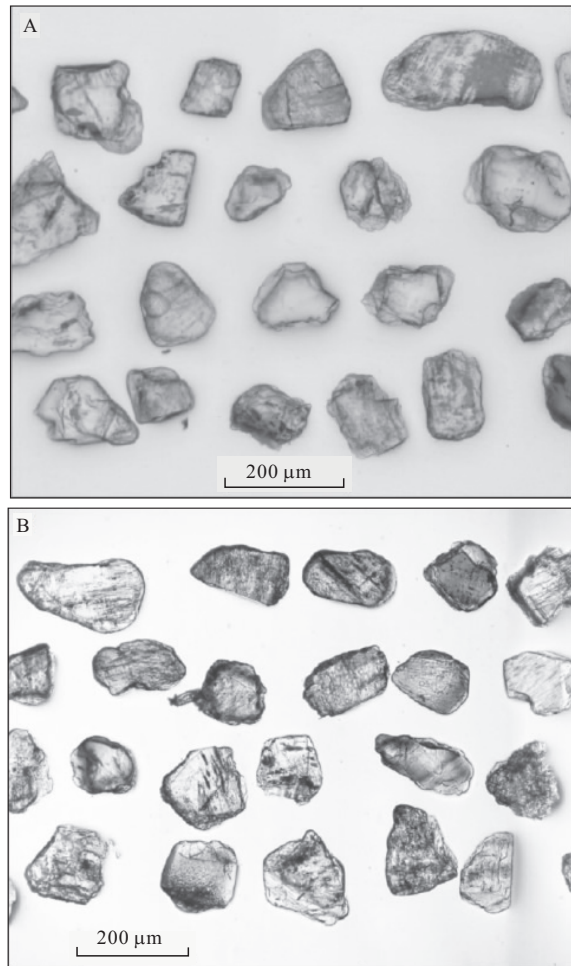


图 2 黄河钾长石反射光(A)和透射光(B)照片
Fig. 2 Reflected light (A) and transmitted light (B)
from the Yellow River's K-feldspar grains

ICPMSDataCal 完成^[38]。每个颗粒选取无包裹体区域进行打点测试,每个颗粒打点测试一次,测试误差为 5%。

2 实验结果

本次研究在黄河、滹沱河、滦河、辽河和漳河现代河流沉积物中获取 200 个碎屑钾长石的常量和微量元素数据(表 1, 2)。黄河的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 、 MgO 、 P_2O_5 、 CaO 、 MnO 、 FeO 和 TiO_2 的平均质量分数分别为: 63.7%, 20.8%, 13.8%, 1.30%, 0.014%, 0.034%, 0.45%, 0.0015%, 0.065%, 0.0056%, 其中尤以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 的质量分数最高,均值均超过 1% 以上;其他 4 条河流的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 平均质量分数范围分别为: 63.4%~63.5%, 19.8%~20.8%, 14.5%~15.3%, 0.75%~1.1%, 总体相差不大。除了 K_2O 外,黄河的这 3 个常量元素的平均质量分数要比另外 4 条河流偏高。黄河(3.7%)和辽河(4.3%)的钾长石 Li 元素平均质量分数要比其他河流高(表 2);黄河的 Be 和 Ni 质量分数比其他 4 条河流高。黄河钾长石的 Sr 和 Ba 平均质量分数分别为: 832×10^{-6} 和 5415×10^{-6} 。其他 4 条河流的 Sr 和 Ba 的平均质量分数分别为: $305 \times 10^{-6} \sim 410 \times 10^{-6}$ 和 $2283 \times 10^{-6} \sim 3711 \times 10^{-6}$ 。钾长石的 Pb 元素平均质量分数以黄河和滦河最高。

黄河干流碎屑钾长石的常量元素 Na_2O 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 K_2O 的标准偏差分别为 1.68, 1.0, 0.73,

表 1 渤海湾盆地主要注入河流的钾长石常量元素组成

Table 1 Major element compositions of K-feldspars in the river sediments around the Bohai Bay Basin

样品		SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	MgO	P_2O_5	CaO	MnO	FeO	TiO_2	Li	Be
		$w_B/\%$											
DM-1 (黄河)	最大值	64.7	25.3	15.7	8.89	0.280	0.136	5.83	0.038 5	0.655	0.030 7	21.00	6.90
	平均值	63.7	20.8	13.8	1.30	0.014	0.034	0.45	0.001 5	0.065	0.005 6	3.70	0.50
	最小值	59.7	19.9	0.34	0.37	0.0	0.013	0.0	0.0	0.003	0.000 4	0.0	0.0
HTH-1 (滹沱河)	最大值	64.4	20.8	15.7	1.93	0.013 9	0.125	0.39	0.001 5	0.122	0.005 8	4.70	2.40
	平均值	63.4	20.4	14.5	1.04	0.000 7	0.028	0.11	0.000 3	0.030	0.002 6	1.00	0.40
	最小值	62.5	19.7	13.1	0.55	0.0	0.014	0.0	0.0	0.007	0.000 4	0.0	0.0
LH-2 (滦河)	最大值	63.9	20.7	16.2	4.43	0.026 1	0.142	0.54	0.002 6	0.125	0.033 2	14.00	1.02
	平均值	63.3	20.2	14.8	0.75	0.001 0	0.034	0.14	0.000 5	0.020	0.004 5	1.70	0.49
	最小值	62.5	19.6	13.6	0.39	0.0	0.015	0.02	0.0	0.003	0.000 2	0.0	0.0
TA-3 (辽河)	最大值	64.4	21.0	16.2	0.53	0.013 4	0.11	0.61	0.005 3	0.623 5	0.04	19.90	2.79
	平均值	63.5	20.1	14.7	0.80	0.001 0	0.03	0.11	0.000 5	0.065 0	0.005 5	4.30	0.36
	最小值	62.5	19.5	9.9	0.28	0.0	0.02	0.02	0.0	0.001 3	0.001	0.04	0.0
ZHH-1 (漳河)	最大值	64.5	20.4	19.0	2.20	0.078	0.057	0.34	0.008 3	0.260	0.016 3	4.90	2.86
	平均值	63.4	19.8	15.3	1.10	0.006	0.021	0.13	0.001 0	0.068	0.004	0.50	0.55
	最小值	62.8	19.1	12.7	0.06	0.0	0.008	0.0	0.0	0.010	0.000 4	0.0	0.0

表 2 渤海湾盆地主要注入河流钾长石常、微量元素组成

Table 2 Major and trace element compositions of K-feldspars in the river sediments around the Bohai Bay Basin

样品		B	Ni	Sr	Pb	Ba
		$w_B/10^{-6}$				
DM-1 (黄河)	最大值	12.00	10.00	1 779	241.00	16 675
	平均值	3.90	0.40	832	70.00	5 415
	最小值	0.0	0.0	11	8.40	15
HTH-1 (滦河)	最大值	5.58	2.50	990	100.00	13 721
	平均值	3.30	0.10	337	44.00	3 711
	最小值	0.0	0.0	23	10.00	660
LH-2 (滦河)	最大值	11.30	2.60	1 154	186.00	7 163
	平均值	4.02	0.14	410	72.00	3 529
	最小值	0.0	0.0	73	28.3	674
TA-3 (辽河)	最大值	11.10	2.20	948	132.00	7 635
	平均值	4.09	0.11	305	63.40	2 283
	最小值	0.0	0.0	2	7.49	3
ZHH-1 (漳河)	最大值	21.10	4.42	1 015	121.00	9 625
	平均值	3.43	0.13	366	41.10	2 901
	最小值	0.0	0.0	3	1.64	5

3.0(图 3-a),其他 4 条河流的分布态势基本一致,因而黄河与滦河、滦河、辽河和漳河 4 条河流存在显著差异。在图 3-b 中,黄河、辽河、滦河的钾长石 Li 元素标准偏差要比滦河和漳河大;漳河的钾长石 B 元素标准偏差在所有分析的河流中最高,达到 3.85;黄河钾长石的 Zn 元素标准偏差达到 6.39,和其他 4 条河流相比存在显著差异。从图 3-c 可以看出,这 5 条河流的钾长石 Sr 和 Ba 元素的标准偏差出现峰值,尽管黄河略微偏高,但总体的分布样式基本一致。因而,黄河钾长石的 Na_2O 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 K_2O 、Ni、Zn 和 Ba 含量的标准偏差可以作为区分环渤海湾其他主要注入河流的特征值。

通常将两个常量或微量元素的质量分数或者比值做散点图,用于反映火成岩演化作用、判别构造环境、揭示源区性质等^[39]。我们将钾长石的常量和微量元素两两一对制作二维散点图。从图 4-a 中可以看出:所有河流的碎屑钾长石 Na_2O 与 K_2O 质量分数出现明显的负相关关系,大部分颗粒重叠在一起,没有出现特征河流。但在辽河和黄河样品各自出现两颗低 Na_2O 和 K_2O 质量分数的钾长石;在 SiO_2 与 Al_2O_3 质量分数二维散点图中(图 4-b),二者存在弱负相关关系,在黄河样品出现 3 颗高 SiO_2 的钾长石颗粒。在 Al_2O_3 质量分数分别与 Na_2O 和 K_2O 质量分数二维散点图中,可以发现有部分黄河的 Al_2O_3 质量分数较之整体部分偏低(图 4-c,d)。在 FeO 质量分数和 MgO 质量分数(图 4-e), FeO 质量分数和 MnO 质量分数(图 4-f)二维散点图中,除了漳河和黄河的个别颗粒异于整体部分外,其余颗粒重叠在一起,没有特征河流出现。而在 TiO_2

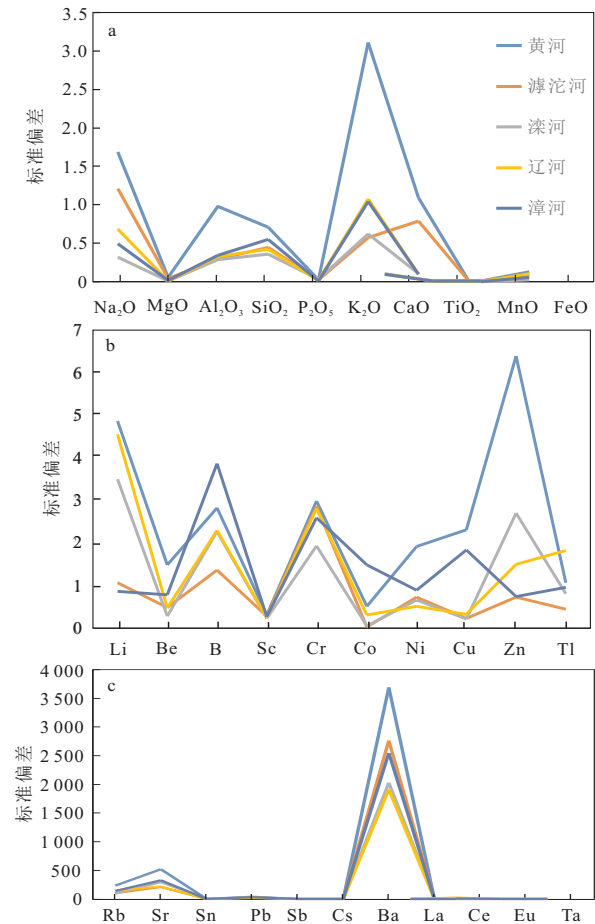


图 3 环渤海湾主要河流常量元素(a)和微量元素(b, c)标准偏差对比图

Fig. 3 Standard deviation curves of major (a) and trace(b, c) elements from the river sediments surrounding the Bohai Bay Basin

质量分数和 P_2O_5 质量分数(图 4-g),以及 CaO 和 P_2O_5 质量分数(图 4-h)二维散点图中,除了大部分颗粒重叠、集中在一个区域外,还出现了部分偏离于集中区的异常点,但同样没有出现特征河流。

在 Pb 和 Ba 质量分数(图 5-a)、Pb 和 Sr 质量分数(图 5-b)、Ba 和 Sr 质量分数(图 5-c)、Sn 和 Ba 质量分数(图 5-d)以及 Sr 和 Rb 质量分数(图 5-e)微量元素二维散点图中,所分析的 5 条河流的大部分样品集中在一个区域,但是黄河部分样品形成了偏离整体分布的区域,因而黄河的钾长石 Ba 和 Sr 含量变化可以成为今后环渤海湾盆地物源示踪的特征指标。在 Rb 和 Ga 质量分数二维散点图中(图 5-f),各条河流的样品分析结果集中分布在一个区域内,没有出现特征河流。而 Be 和 Li 质量分数(图 5-g),B 和 Li 质量分数(图 5-h)二维散点图中,各条河流除了集中分布在一个区域外,还有个别样品零散分布,尤其是黄河和辽河的样品,但是二者混合在一起,并不能很好地区分。

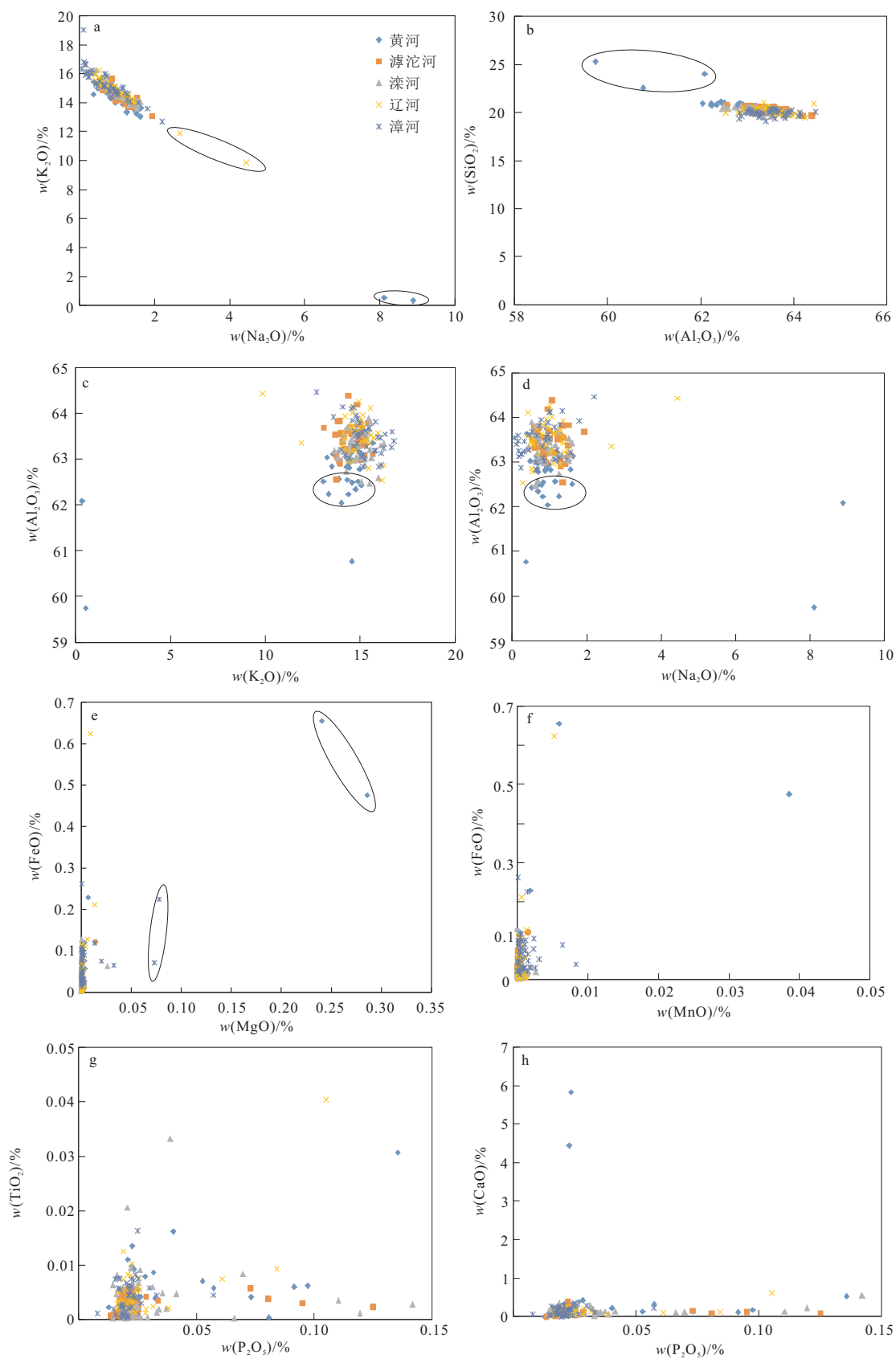


图 4 环渤海湾盆地主要注入河流碎屑钾长石常量元素质量分数二维散点图

Fig. 4 Correlation plots of K_2O vs Na_2O , SiO_2 vs Al_2O_3 , Al_2O_3 vs K_2O , Al_2O_3 vs Na_2O , FeO vs MgO , FeO vs MnO , TiO_2 vs P_2O_5 and CaO vs P_2O_5 for the river sediments of K-feldspar grains from the Bohai Bay Basin

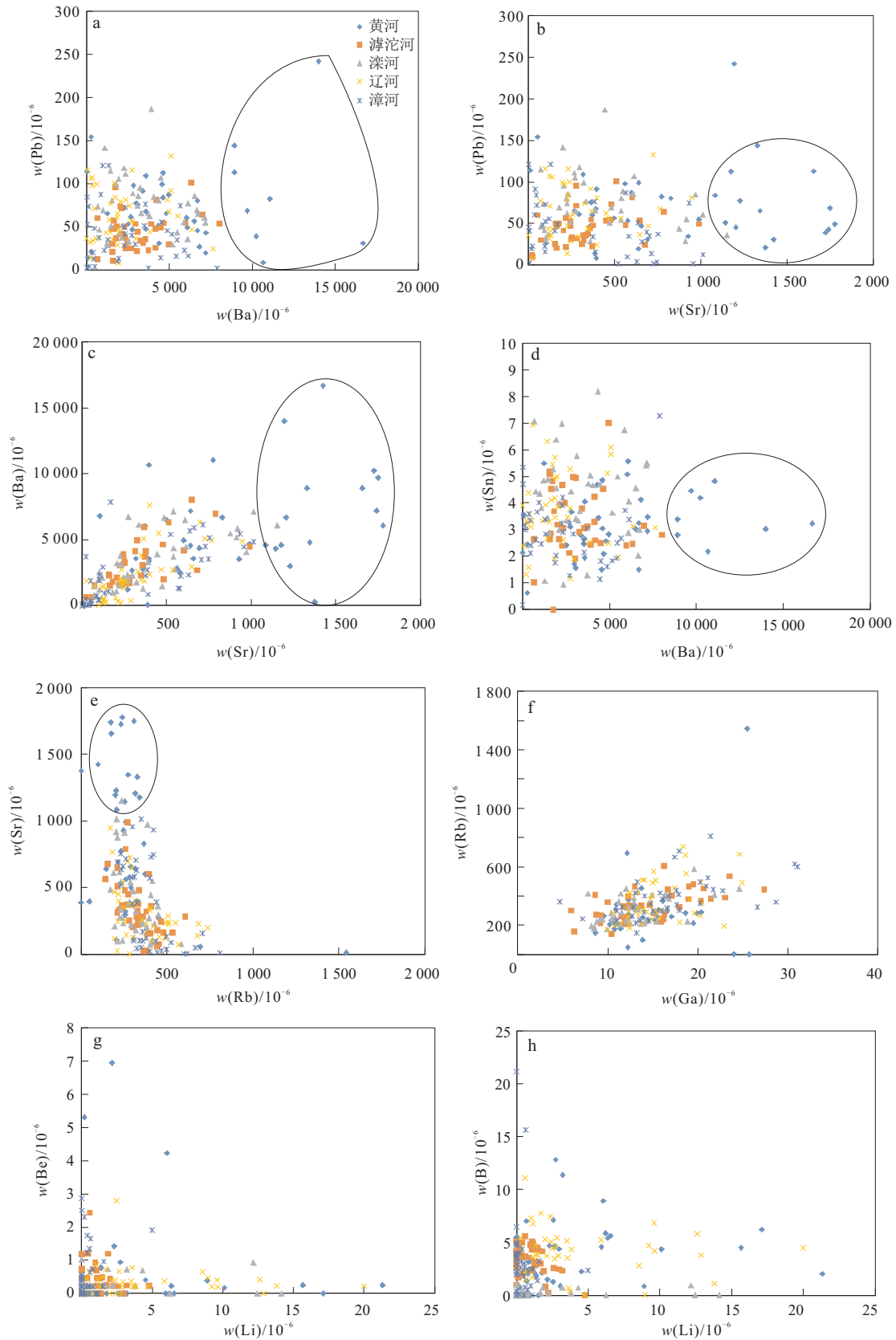


图 5 环渤海湾盆地主要注入河流碎屑钾长石微量元素二维散点图

Fig. 5 Correlation plots of Pb vs Ba, Pb vs Sr, Ba vs Sr, Sn vs Ba, Sr vs Rb, Rb vs Ga, Be vs Li, B vs Li for the river sediments of K-feldspar grains from the Bohai Bay Basin

3 讨论

渤海湾盆地周缘分别由黄河、滹沱河、滦河、辽河、漳河等水系注入,河流水系十分发育,是一个多物源沉积盆地,使其成为探讨造山带剥蚀、河流搬运、盆地沉积“源—汇”过程的天然实验室。因而,选择理想的物源示踪指标区分这些注入河流,是重建其盆山耦合关系的关键步骤。通过以上实验分析结果来看,黄河的钾长石常量元素标准偏差值要比其他4条河流(滹沱河、滦河、辽河和漳河)偏高。在 Al_2O_3 分别与 Na_2O 与 K_2O 质量分数二维散点图中,黄河样品中有部分钾长石的 Al_2O_3 平均值较之整体部分偏低;同时在Pb和Ba、Pb和Sr、Ba和Sr、Sn和Ba、Sr和Rb二维散点图中,黄河的部分样品形成特定分布区,这都说明黄河能成为注入渤海湾盆地的特征河流。一方面反映黄河中下游与滹沱河、滦河、辽河、漳河均流动在华北克拉通内部,基岩侵蚀物源区单一,导致钾长石的常量与微量元素大部分重叠在一起。另一方面,黄河中下游流经黄土高原,而黄土高原是一个多物源沉积汇区,包含了中国西北和蒙古国南部广泛的沙漠、戈壁以及沙化土地的物质^[40-44],同时黄河上游流域面积广,流经羌塘地块、祁连地块和西秦岭地块,因而不同地块的物质组成存在差异,黄河将青藏高原东北缘的碎屑物质搬运进入黄土高原^[14],导致黄土高原的物质组成极其复杂,这可能是黄河的钾长石物质组成与其他4条河流存在差异的主要原因。因而钾长石微量元素Ba和Sr含量变化使其成为今后渤海湾盆地物源示踪研究的目标矿物之一。

然而,首先值得注意的是,滹沱河和滦河的样品中有部分颗粒落入上述黄河特征区域内,这说明黄河、滹沱河和滦河均受到风成沉积物搬运的影响,部分样品具有共同的来源,同时也和黄河下游的多次河道摆动,导致滹沱河和黄河下游的物质混染也不无关系。这与前人在渤海湾西北部钻孔开展的稀土元素分析结果吻合^[21]。再者,尽管通过钾长石的常量与微量元素分析,确定黄河为渤海湾盆地盆山耦合、盆地钻孔物源示踪研究的特征河流。但是,在进一步区分和探讨燕山水系和太行山水系,以及来自大兴安岭南部的辽河水系的物源特征时,钾长石的常量和微量元素特征并不能达到研究目的。这需要结合前人已经报道的研究结果,系统判定环渤海湾盆地各主要注入河流的特征物源示踪指标。例如金秉福等^[24]提取黄河、辽河和鸭绿江表层沉积物中的角闪石,发现这3条河流的常量元素组成相近,但微量元素组成明显不同,认为角闪石的微量元素特征可作为物源识别的判别标志。矿物组合分析结果表

明,辉石类、帘石类、金属类稳定矿物主要来自滦河;角闪石类、云母类矿物主要物源为海河和黄河^[22]。目前研究者多采用从“源”到“汇”(source to sink)的研究思路进行渤海湾盆地的物源示踪研究。主要的研究方法包括重矿物分析、单颗粒类型矿物分析、单颗粒矿物测年等方法。但我们也能看到,在这些研究结果中,单一的物源示踪指标似乎难以满足渤海湾盆地系统的物源示踪研究的目的,同一特征性物源示踪指标在2条河流里同时出现等。因而,在今后的研究中,需要结合每条河流的特征物源示踪指标,开展多物源示踪方法联合使用,以及继续开发新的物源示踪指标。

4 结语

通过对黄河、滹沱河、滦河、辽河、漳河的钾长石进行地球化学元素分析,黄河干流碎屑钾长石的常量元素 Na_2O 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 K_2O 的标准偏差与滹沱河、滦河、辽河和漳河4条河流存在差异。黄河的钾长石Ba和Sr含量变化可以成为今后环渤海湾盆地物源示踪的特征指标。但目前尚未对来自燕山水系和大兴安岭南部的辽河水系进行物源指标的差异研究,尚不能区分它们的物源特征。期望在今后的研究中,进一步结合每条河流的特征物源示踪指标,以及开展多物源示踪方法联合使用,进行更深入研究或发现新的物源示踪指标。

参考文献:

- [1] 杨守业. 亚洲主要河流的沉积地球化学示踪研究进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(6): 648-655.
- [2] 刘静, 张金玉, 葛玉魁, 等. 构造地貌学: 构造—气候—地表过程相互作用的交叉研究[J]. 科学通报, 2018, 63(1): 3070-3088.
- [3] 林旭, 刘静, 彭保发, 等. 青藏高原周围河流基岩和碎屑矿物低温热年代学研究进展[J]. 地震地质, 2017, 39(6): 1091-1110.
- [4] 林旭, 刘静. 江汉和洞庭盆地与周缘造山带盆山耦合研究进展[J]. 地震地质, 2019, 41(2): 499-520.
- [5] 赵希涛, 胡道功, 吴中海, 等. 长江三角洲地区晚新生代地质与环境研究进展述评[J]. 地质力学学报, 2017, 23(1): 1-64.
- [6] 赵迎冬, 张永超, 王全利, 等. 南堡凹陷物源体系发育特征与优质储层形成[J]. 地质科技情报, 2018, 37(1): 128-134.
- [7] 蒋一鸣. 西湖凹陷平湖斜坡带平湖组碎屑锆石U-Pb年龄及米兰科维奇旋回: 对源—汇系统及沉积演化的约束[J]. 地质科技情报, 2019, 38(6): 133-140.
- [8] 张建新, 范彩伟, 谭建财, 等. 莺歌海盆地中新世沉积体系演化特征及勘探意义[J]. 地质科技情报, 2019, 38(6): 51-59.
- [9] Li S Z, Zhao G H, Dai L M, et al. Cenozoic faulting of the Bohai Bay Basin and its bearing on the destruction of the eastern North China Craton [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 47(1): 80-93.
- [10] 吴忱, 张秀清, 马永红. 华北山前地貌面与新生代构造运动[J]. 华北地震科学, 1996, 14(4): 40-50.
- [11] 徐杰, 计凤桔. 渤海湾盆地构造及其演化[M]. 北京: 地震出版

- 社, 2015
- [12] 陈洪云, 孙有斌, 黄土高原风尘沉积的物质来源研究: 回顾与展望[J]. 第四纪研究, 2008, 28(5): 892-900.
- [13] 王中波, 杨守业, 李日辉, 等. 黄河水系沉积物碎屑矿物组成及沉积动力环境约束[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(4): 73-85.
- [14] Xu Q, Yang J, Yuan G, et al. Stratigraphic sequence and episodes of the ancient Huanghe delta along the southwestern Bohai Bay since the LGM[J]. Marine Geology, 2015, 367(1): 69-82.
- [15] Nie J S, Stevens T, Rittner M, et al. Loess plateau storage of northeastern Tibetan Plateau-derived Yellow River sediment [J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 1-8.
- [16] Hu Z B, Pan B T, Bridgland D, et al. The linking of the upper-middle and lower reaches of the Yellow River as a result of fluvial entrenchment[J]. Quaternary Science Reviews, 2017, 166(3): 324-338.
- [17] Yi L, Yu H J, Ortiz J D, et al. Late Quaternary linkage of sedimentary records to three astronomical rhythms and the Asian monsoon, inferred from a coastal borehole in the south Bohai Sea, China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2012, 329(5): 101-117.
- [18] Yao Z, Guo Z, Xiao G, et al. Sedimentary history of the western Bohai coastal plain since the Late Pliocene: Implications on tectonic, climatic and sea-level changes[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 54(2): 192-202.
- [19] Hu B Q, Li G, Li J, et al. Provenance and climate change inferred from Sr-Nd-Pb isotopes of Late Quaternary sediments in the Huanghe (Yellow River) delta, China[J]. Quaternary Research, 2012, 78(3): 561-571.
- [20] 杨守业, 蔡进功, 李从先, 等. 黄河贯通时间的新探索[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(2): 15-20.
- [21] 盛晶瑾. 渤海湾西北部晚更新世以来沉积物稀土元素特征及物源意义[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [22] 韩宗珠, 衣伟虹, 李敏, 等. 渤海湾北部沉积物重矿物特征及物源分析[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2013, 43(4): 73-79.
- [23] 王昆山, 石学法, 蔡善武, 等. 黄河口及莱州湾表层沉积物中重矿物分布与来源[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(6): 1-8.
- [24] 金秉福, 岳伟, 王昆山. 黄河、辽河和鸭绿江沉积角闪石矿物化学特征对比及物源识别[J]. 海洋学报, 2014, 36(4): 11-21.
- [25] 蓝先洪, 秦亚超, 陈晓辉, 等. 渤海东部晚第四纪沉积环境变化的稀土元素地球化学记录[J]. 海洋通报, 2016, 35(6): 674-682.
- [26] 陈贺贺, 朱筱敏, 黄捍东, 等. 基于碎屑锆石定年的饶阳凹陷蠡县斜坡沙河街组物源分析[J]. 地球科学, 2017, 42(11): 1955-1971.
- [27] Tan M, Zhu X, Liu W, et al. Sediment routing systems in the second member of the Eocene Shahejie Formation in the Liaoxi Sag, offshore Bohai Bay Basin: A synthesis from tectono-sedimentary and detrital zircon geochronological constraints[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 94: 95-113.
- [28] 林旭. 利用碎屑钾长石普通 Pb 同位素重建古嘉陵江、古长江自中新世以来的流向[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2011.
- [29] 张文, 刘勇胜, 胡兆初. 微区原位 LA-MC-ICP-MS 铅同位素分析研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2018, 37(5): 812-826.
- [30] Tyrrell S, Haughton P D W, Daly J S, et al. The use of the common Pb isotope composition of detrital K-feldspar grains as a provenance tool and its application to Upper Carboniferous paleodrainage, northern England[J]. Journal of Sedimentary Research, 2006, 76(2): 324-345.
- [31] Clift P D, Long H V, Hinton R, et al. Evolving east Asian river systems reconstructed by trace element and Pb and Nd isotope variations in modern and ancient Red River-Song Hong sediments[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2008, 9(4): 1-29.
- [32] Alizai A, Clift P D, Giosan L, et al. Pb isotopic variability in the modern-Pleistocene Indus River system measured by ion microprobe in detrital K-feldspar grains[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2011, 75(17): 4771-4795.
- [33] Shulaker D Z, Grove M, Hourigan J K, et al. Detrital K-feldspar Pb isotopic evaluation of extraregional sediment transported through an Eocene tectonic breach of southern California's Cretaceous batholith [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2019, 508(1): 4-17.
- [34] Johnson S P, Kirkland C L, Evans N J, et al. The complexity of sediment recycling as revealed by common Pb isotopes in K-feldspar[J]. Geoscience Frontiers, 2018, 9(5): 1515-1527.
- [35] Xu Y M, Jiang S Y. In-situ analysis of trace elements and Sr-Pb isotopes of K-feldspars from Tongshankou Cu-Mo deposit, SE Hubei Province, China: Insights into early potassic alteration of the porphyry mineralization system [J]. Terra Nova, 2017, 29(6): 343-355.
- [36] Zong K Q, Klemd R, Yuan Y, et al. The assembly of Rodinia: The correlation of Early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt(CAOB)[J]. Precambrian Research, 2017, 290: 32-48.
- [37] Hu Z C, Zhang W, Liu Y S, et al. "Wave" signal smoothing and mercury removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICP-MS analysis: Application to lead isotope analysis[J]. Analytical Chemistry, 2015, 87: 1152-1157.
- [38] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257: 34-43.
- [39] 张宏飞, 高山. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- [40] Sun J M. Nd and Sr isotopic variations in Chinese eolian deposits during the past 8 Ma: Implications for provenance change [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 240(2): 454-466.
- [41] Sun J M, Zhu R X. Temporal variations in Pb isotopes and trace element concentrations within Chinese eolian deposits during the past 8 Ma: Implications for provenance change[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 290(3): 438-447.
- [42] Sun Y B, Tada R, Chen J, et al. Tracing the provenance of fine-grained dust deposited on the central Chinese Loess Plateau [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(1): 1-5.
- [43] Ferrat M, Weiss D J, Strekopytov S, et al. Improved provenance tracing of Asian dust sources using rare earth elements and selected trace elements for palaeomonsoon studies on the eastern Tibetan Plateau[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2011, 75: 6374-6399.
- [44] Zhao W C, Liu L W, Chen J, et al. Geochemical characterization of major elements in desert sediments and implications for the Chinese loess source[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(9): 1-13.