

中国北部陆架海碎屑锆石 U-Pb 年龄和 钾长石主微量元素物源示踪研究

林旭¹⁾, 刘静²⁾, 吴中海³⁾, 王世梅¹⁾, 赵希涛⁴⁾, 陈勇¹⁾, 李兆宁⁵⁾, 刘海金⁶⁾

1) 三峡大学, 湖北宜昌, 443002; 2) 天津大学, 天津, 300072; 3) 地科院地质力学研究所, 北京, 100081;
4) 中科院地质与地球物理研究所, 北京, 100029; 5) 中国地震局地质研究所, 北京, 100029;
6) 东华理工大学, 江西南昌, 330013

内容提要:渤海湾盆地每年沉积大量的河流碎屑物质, 但其中的砂级物质能否迁移扩散到胶东半岛海湾内一直不清楚。锆石和钾长石分别是河流沉积物中常见的副矿物和主要造岩矿物之一, 由于各自的 U-Pb 年龄和地球化学元素组成在不同区域内存在显著差异, 是进行物源示踪研究的理想矿物。基于此, 本文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和胶东半岛的威海湾和银滩湾的海岸砂开展碎屑锆石 ($n=438$) 和钾长石 ($n=160$) 微区原位 U-Pb 年龄、Th/U 比值和主微量元素分析, 结果表明威海湾和银滩湾内的砂级沉积物的碎屑锆石以具有典型的新元古代峰值年龄 (697~735 Ma), 缺乏古元古代和新太古代峰值年龄为特征, Th/U 比值和胶东基岩接近, 结合 Kolmogorov-Smirnov 统计方法的多维判别图 (MDS), 说明这些砂级碎屑物质的源区主要是以胶东半岛为源区的近源物质。而黄河口的碎屑钾长石原位 (in situ) Na_2O 、 K_2O 、 Al_2O_3 和 Rb、Sr、Ba、Pb 元素含量变化与刘公岛和银滩的海砂样品截然不同, 进一步验证了上述碎屑锆石的研究结果。因而将碎屑锆石和钾长石原位地球化学分析相结合有助于精准判定物源关系, 在今后中国北部陆架海物源示踪研究、渤海湾盆地盆山耦合研究中将具有良好的应用前景。

关键词:渤海; 胶东半岛; 锆石; U-Pb 年龄; 钾长石; 元素特征; 物源示踪

随着印度和太平洋板块向欧亚大陆俯冲, 举世闻名的青藏高原和面积广阔的边缘海系统出现在东亚地区 (Wang Chengshan et al., 2014a; Li Sanzhong et al., 2019)。发源于青藏高原的黄河、长江等大河是建立青藏高原隆升剥蚀与西太平洋边缘海物质联系的纽带 (Milliman et al., 2013; Zhao Xitao et al., 2017; Li Li et al., 2020)。特别是黄河平均每年流入渤海的碎屑物质超过 $1 \times 10^9 \text{ t}$, 占到渤海碎屑物质输入量的 90% (Wu Chen, 2008)。在沿岸流和潮汐的相互作用下, 这些碎屑物质被搬运和再沉积, 形成黄、渤海泥、砂混合沉积的主体 (Qiao Shuqing et al., 2017; Liu Xingmin et al., 2020), 对中国北部陆架海的物理、化学和生物过程起着重要的作用 (Saito et al., 2001)。然而, 以往

的研究主要集中在悬移质的扩散研究上 (Qiao Shuqing et al., 2017; Hu Gang et al., 2018; Liu Xingmin et al., 2020; Zhong Wei et al., 2020), 对砂级沉积物的扩散研究较少。海砂堆积体具有阻挡波浪, 防止海岸侵蚀的作用, 更是一种重要的海洋生态环境要素。因而研究海砂的物质来源, 对于滨海海岸地貌研究、生态环境保护、合理可持续地开发利用海砂资源等都具有重要意义 (Chen Lirong, 2008; Wang Peng et al., 2014b)。然而, 目前对黄海北部胶东半岛周围海湾的砂级沉积物是来自渤海湾还是以近源地区为主, 一直不清楚。

将沉积区 (汇) 与潜在物源区 (源) 进行比较, 是河流、海岸带沉积物物源示踪的基本思路 (Zhao Xitao et al., 2017; Lin Xu et al., 2017, 2019; Liu

注: 本文为国家自然科学基金项目 (编号 41702178, 41972212) 资助的成果。

收稿日期: 2020-05-01; 改回日期: 2020-05-28; 网络发表日期: 2020-08-19; 责任编辑: 任东; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 林旭, 男, 1984 年生, 博士, 副教授, 从事青藏高原隆升与长江和黄河起源研究。Email: hanwuji-life@163.com。通讯作者: 吴中海, 男, 1974 年生, 博士, 研究员, 从事活动构造与地震地质研究。Email: wzhh4488@sina.com。

引用本文: 林旭, 刘静, 吴中海, 王世梅, 赵希涛, 陈勇, 李兆宁, 刘海金. 2020. 中国北部陆架海碎屑锆石 U-Pb 年龄和钾长石主微量元素物源示踪研究. 地质学报, 94(10): 3024~3035. doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020261.
Lin Xu, Liu Jing, Wu Zhonghai, Wang Shimei, Zhao Xitao, Chen Yong, Li Zhaoning, Liu Haijin. 2020. Detrital zircon U-Pb ages and K-feldspar main and trace elements provenance studying from fluvial to marine sediments in northern China. Acta Geologica Sinica, 94(10): 3024~3035.

Jing et al., 2009; Guo Ronghua et al., 2020)。长期以来,河流三角洲和边缘海沉积物的重矿物组合,以及沉积物全岩元素组成和同位素比值分析被广泛用于陆-海沉积物的源-汇关系研究(Rao Wenbo et al., 2015; Hahn et al., 2018; Fyhn et al., 2019; Carassai et al., 2019)。然而,这些传统分析方法得到的结果大多是均一化的物源信息。此外,在过去十几年来中,激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法(LA-ICP-MS)具有更高的空间分辨率,以及更快、更经济的原位(in situ)单颗粒矿物成分分析,从而被广泛应用于石榴石(Hong Dongming et al., 2020),石英(Monnier et al., 2018),金红石(Bracciali et al., 2013),锆石(Fyhn et al., 2019),磷灰石(O'Sullivan et al., 2020),独居石(Liu Xiaochi et al., 2017),榍石(Guo Ronghua et al., 2020),钾长石(Johnson et al., 2018)等矿物的U-Pb年龄和主、微量元素分析上。从而弥补了传统物源示踪分析方法的不足。

碎屑锆石是河流沉积物中广泛分布的副矿物,其U-Pb年龄谱对比已普遍应用于物源示踪研究(Zheng Ping et al., 2013; Kon Ping et al., 2014; Fyhn et al., 2019)。钾长石(包括微斜长石、条纹长石)是主要的成岩矿物之一,经过侵蚀搬运过程而广泛存在于河流沉积物中(Blowick et al., 2019)。钾长石的一般分子式为: $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$,其中Rb、Sr、Ba和Pb元素在钾长石颗粒中显著富集(Heier et al., 1959; Joseph et al., 1988)。在不同的温度和压力条件下,钾长石的主量元素和上述微量元素组成存在显著差异(Patterson et al., 1964; Rhodes, 1969; McCarthy et al., 1976; Bea et al., 1994; Adam et al., 1997; Bureau et al., 2003; Tulloch et al., 2013; Xu Yaoming et al., 2017)。因此,碎屑钾长石是沉积物源分析中最常用的矿物之一。相比于锆石能经历多期次的沉积循环不同,钾长石通常易于风化,经历的沉积期次少,因而将二者的优势相结合,进行物源示踪研究时判别物源区更有效(Tyrrell et al., 2006; Flowerdew et al., 2012; Johnson et al., 2018)。所以,本文开展环渤海湾盆地主要注入河流碎屑锆石U-Pb年代学分析,结合碎屑钾长石主、微量元素以及前人在区域内的研究结果,系统判别胶东半岛海湾内的砂级物质是否来自渤海的河流;评价中国北部陆架海多物源示踪方法联合使用的效果,为渤海湾盆地的大河演化、盆山耦合、中国北部

陆架海物质扩散研究提供对比数据。

1 地质背景

1.1 华北克拉通

华北克拉通是中国最大的古老陆块,具有 $3 \times 10^5 \text{ km}^2$ 的面积(图1)。它的主体部分形成于中-晚太古代(2.5~2.7Ga),在其东部出现3.5~3.8Ga的岩石,整体上被中元古代至新生代沉积岩覆盖(Zhai Mingguo et al., 2000; Zhao Guochun et al., 2005)。华北克拉通东部和西部最后一次合并发生在约1.85Ga。进入早中生代,随着太平洋板块向欧亚大陆俯冲,导致华北克拉通发生活化(Zhu Rixiang et al., 2012),伴随着克拉通内部大规模的隆起和岩浆作用(115~135Ma)的开始(Yang Jinhui et al., 2008),以及裂谷盆地的发育与发展(Li Sanzhong et al., 2012)。

1.2 胶东半岛

胶东半岛位于渤海和黄海之间,以五莲-烟台断裂为界(图2),在构造上可将半岛分为两部分:北部的胶北地体和东部的胶东地体(Yang Qiongyan et al., 2014)。胶北地体具有华北克拉通的属性,其前寒武基底主要为太古代、古元古代,以及新元古代地层(Zhao Rui et al., 2018)。胶东地体具有扬子克拉通苏鲁超高压的属性,其前寒武基底主要为新元古代花岗质片麻岩,锆石年龄集中在600~800Ma(Tang Jun et al., 2008; Zhang Juan et al., 2010; Zong Keqing et al., 2010)。锆石U-Pb年代学结果表明,晚侏罗世(160Ma)和早白垩世(115~130Ma)花岗质侵入岩体在胶北和胶东地体广泛分布(Tang Jun et al., 2008; Yang Qiongyan et al., 2014)。

1.3 河流和海洋

汇入渤海的河流,从北到南主要有辽河、滦河、永定河、滹沱河、漳河、黄河等(图1)。其中辽河全长1390km,流域面积219000 km^2 ,是渤海东部最大的河流,每年向渤海输入大约 $3.5 \times 10^7 \text{ t}$ 碎屑物质(Milliman et al., 2013)。滦河发源于内蒙古,全长833km,流域面积44900 km^2 ,每年向渤海输入大约 $2.67 \times 10^7 \text{ t}$ 碎屑物质。永定河全长747km,流域面积47016 km^2 ,向东经华北平原北部注入渤海。滹沱河发源于山西省繁峙县,全长587km,流域面积27300 km^2 。漳河发源于山西长治,长412km,流域面积为18200 km^2 。永定河、滹沱河和漳河等发源于太行山的河流每年向渤海提供大约 $1.8 \times 10^8 \text{ t}$

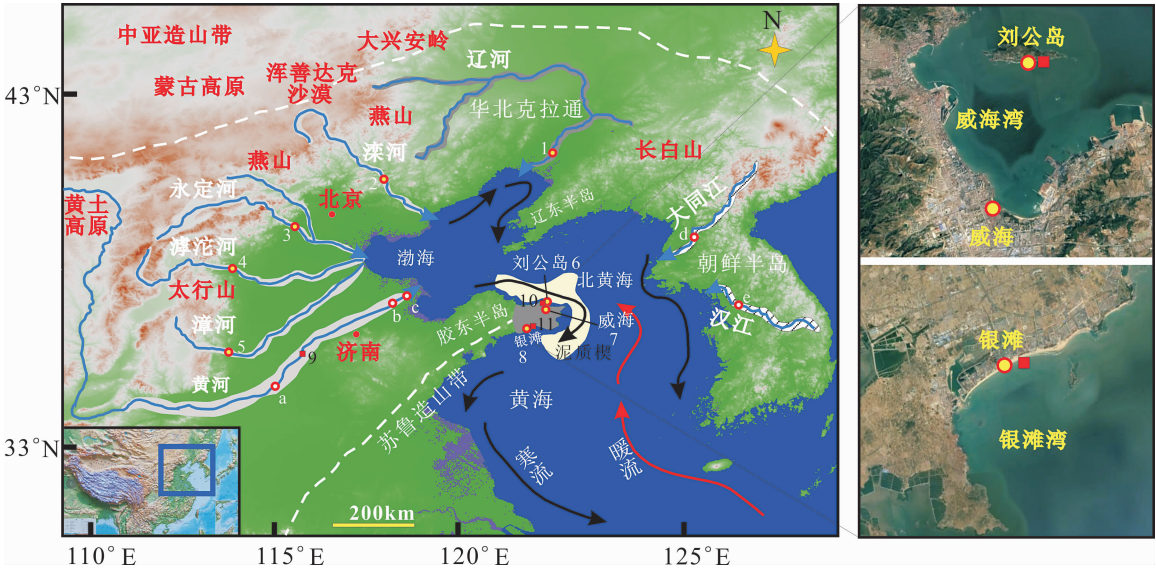


图 1 渤海位置分布图

Fig. 1 Location diagram of Bohai Sea

图中数字 1~8,9~11 分别为锆石和钾长石样品采集地;a-c 为黄河锆石数据 (Yang Jie et al. , 2009; Zheng Ping et al. , 2013);d,e 为朝鲜半岛河流锆石数据(Wu Fuyuan et al. , 2007; Choi et al. , 2016);图中河流区域颜色与图 7 中的颜色相对应

Numbers 1~8, 9~11 are the zircon and K-feldspar sampling sites; a-c are the Yellow River zircon data (Yang Jie et al. , 2009; Zheng Ping et al. , 2013); d,e are the river zircon data of the Korean Peninsula (Wu Fuyuan et al. , 2007; Choi et al. , 2016); the color of the river areas correspond to the colors in figure 7

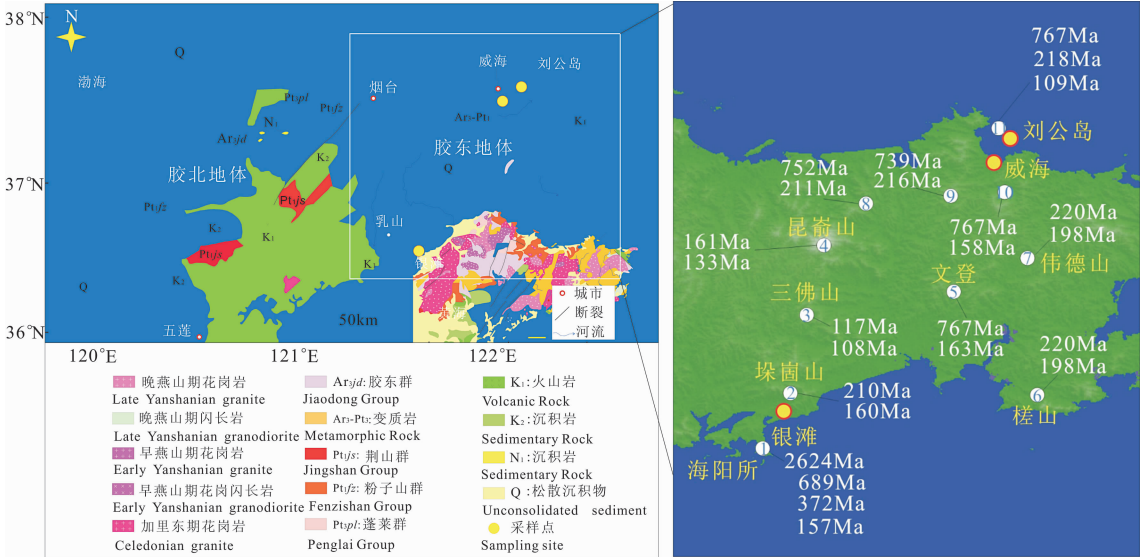


图 2 胶东半岛地质简图 (修改自中国 1 : 250 万地质图,China Geological Survey, 2004)

Fig. 2 A geological sketch map of Jiaodong Peninsula

(revised from China 1 : 250,000 geological map China Geological Survey, 2004)

图中数字序号代表基岩锆石 U-Pb 年龄:(1) Liou et al. , 2006; (2~7) Guo Jinghui et al. , 2005;

(8~10) Tang Jun et al. , 2008; (11) Zong Keqing et al. , 2010

The numerical sequence number in the figure represents the U-Pb age of the bedrock zircon: (1) Liou et al. , 2006;

(2~7) Guo Jinghui et al. , 2005; (8~10) Tang Jun et al. , 2008; (11) Zong Keqing et al. , 2010

碎屑物质 (Wu Chen, 2008)。黄河是我国第二大河,发源于青海巴颜喀拉山北麓,流经青藏高原和黄土高原,向东流入渤海,全长 5464 km,流域面积约

752443 km²,是世界上泥沙含量最高的河流,每年平均向渤海输入超过 1×10⁹ t 泥沙 (Li Li et al. , 2020)。

渤海位于胶东和辽东半岛的西部,面积 77000km²,平均水深 18m。黄河沉积物以高悬浮物质含量高为主要特征(25 g/L)(Milliman et al., 2013),通过山东半岛沿岸流(1.2~2m/s)的搬运进入黄海,在胶东半岛东部形成 Ω 形泥质沉积体(Qiao Shuqing et al., 2017, 图 1)。黄海位于中国大陆和朝鲜半岛之间,面积约 400000km²,平均深度 91m。直接流入黄海的河流主要来自朝鲜半岛的大同江和汉江以及中国大陆的长江和淮河。黄海表层沉积物以细粒泥为主,砂和泥砂混合沉积出现在其东部和西部(Qiao Shuqing et al., 2017)。

威海湾位于胶东半岛东端(图 1),一般水深 6~9m,最大水深 34.5m。威海湾的潮汐类型为不规则的半日潮,平均潮差为 1.35 m,盛行方向一般与海岸线平行,高潮时向西流动。在威海湾口(刘公岛两侧),潮流达到 0.87m/s,但在内部只有 0.05m/s。威海湾表面沉积物以黏土粉砂为主(5.7~6.7Φ)(Zhong Wei et al., 2020),砂质沉积物(1~4.2Φ)主要分布在海岸(Gong Lixin, 2014)。银滩湾位于胶东半岛南部(图 1),由西南向西北延伸约 20km。银滩湾的沉积物主要由中细砂(2~4Φ)为主(Gong Lixin, 2014),潮汐模式是正常的半日潮。海浪的方向主要是东南方向,大致与海岸方向平行,偶尔会受到台风的影响。

2 样品来源及分析方法

2.1 样品来源

2017 年 10 月和 2018 年 7 月,我们分两次对研究区内的河流边滩和现代海岸砂进行样品采集,每个点大约采集 3~5kg 样品。辽河下游干流样品 TA-3 采集地点在辽宁省台安县红庙子村(N41°45′05″,E122°48′15″)。滦河样品 LH-1 采自承德市双滦区三道合村滦河干流(N40°26′04″,E117°38′20″)。样品 YDH-1 位于永定河下游妙峰山峡谷区(N39°59′00″,E116°03′12″)。样品 HTH-1 采自滹沱河下游干流边滩(N38°10′20″,E114°64′47″)。样品 ZHH-1 采自漳河下游太行山和华北平原衔接部位的干流边滩(N36°31′49″,E114°08′31″)。黄河钾长石样品采自山东省东明县黄河干流边滩(N35°20′29″,E115°01′40″),碎屑锆石数据来自 Yang Jie et al. (2009) 和 Zheng Ping et al. (2013)。刘公岛(N37°29′54″,E122°10′49″)、威海(N37°26′02″,E122°10′22″)、银滩(N36°49′39″,E121°42′05″)的样品采自现代海岸潮间带砂体。威海的样品中没有

挑选出碎屑钾长石颗粒。

2.2 实验方法

将野外采集回来的碎屑样品经重砂分析、磁性分选等一系列过程,将锆石和钾长石分离出来,并在双目显微镜下进行人工挑选提纯。每个样品所挑选出来的锆石和钾长石颗粒均在 1000 粒以上,随机挑选 >300 颗制成环氧树脂靶,并对靶片进行表面抛光处理。然后对所有样品进行阴极发光(CL)图像拍摄,结合反射光和投射光图像,了解样品的外部(如矿物裂纹、矿物蚀变和夹杂物)和内部结构,避开包裹体和裂隙部位,选择某一颗粒的分析位置,提高分析精度。

锆石 U-Pb 同位素定年和微量元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICP-MS 同时分析完成(Zong Keqing et al., 2017)。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。本次分析的激光束斑和频率分别为 32 μm 和 5 Hz。U-Pb 同位素定年和微量元素含量处理中采用锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作外标分别进行同位素和微量元素分馏校正。对分析数据的样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算采用软件 ICPMSDataCal 完成(Liu Yongsheng et al., 2008)。锆石样品的 U-Pb 年龄计算采用 Isoplot/Ex-ver3 完成。基于 Kolmogorov-Smirnov (K-S)统计方法的多维判别图(MDS)用于辅助判别样品年龄的远近关系(Vermeesch et al., 2016)。

钾长石微区原位主微量元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICP-MS 完成。激光剥蚀系统和仪器型号与锆石样品一致。本次分析的激光束斑和频率分别为 44 μm 和 5Hz。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(Liu Yongsheng et al., 2008)。分析数据的处理采用软件 ICPMSDataCal 完成。

3 实验结果

所分析样品中的锆石主要呈浑圆状,少部分呈棱角状,反映它们经历长距离搬运;有些锆石晶型完

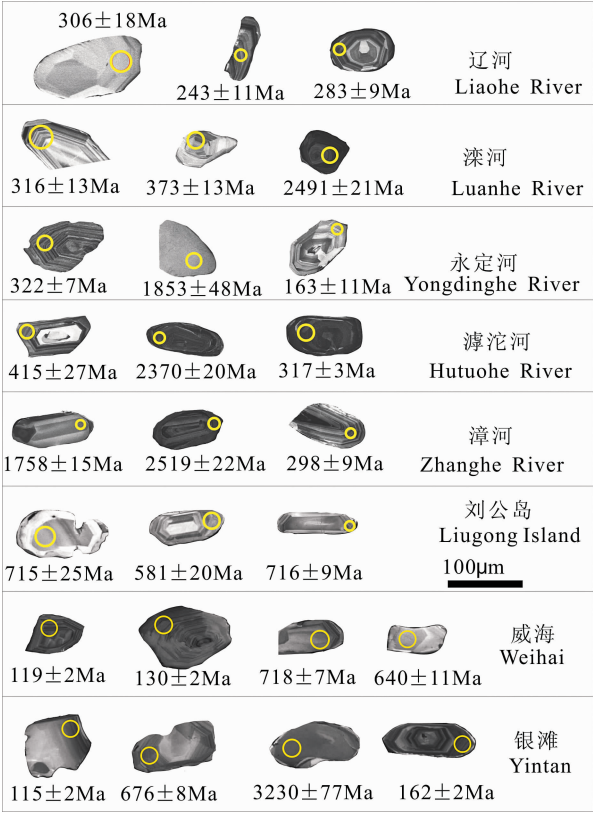


图 3 环渤海湾河流和海洋碎屑锆石 CL 图像，
图中圆圈代表分析点位置

Fig. 3 CL images of zircon grains from the fluvial and marine sands from the Bohai Bay Basin in this study, using the circles present the analysis point position

好,说明有近源物质加入(图 3)。具有振荡环带的锆石居多,代表岩浆成因,同时也有部分变质锆石。

此次共分析 480 颗锆石颗粒,平均一个样品分析 60 颗,选择²⁰⁶Pb/²³⁸U(年龄<1000Ma)与²⁰⁷Pb/²³⁵U或²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb(年龄>1000Ma)谐和度在 90%~99% 之间的结果,共 438 颗锆石合格。如图 4 所示,威海和银滩样品中部分锆石的 Th/U 比值<0.1,和胶东基岩部分锆石的 Th/U 比值接近;剩余锆石 Th/U 比值介于 0.1 和 0.2 之间,形成区域 A。刘公岛样品的锆石 Th/U 比值形成分布区 B 和 C,主要和胶东基岩的分布区重合。此外,还可以看到辽河、滦河、黄河的部分锆石颗粒落在区域 A 和 B 内。

辽河下游样品(TA-3)的年龄主要集中在中生代和晚古生代(141~559 Ma),出现 263 Ma 和 520 Ma 的峰值;古元古代和新太古代峰值年龄分别为 1768 Ma 和 2496Ma(图 5a)。滦河样品(LH-1)锆石 U-Pb 年龄可以划分为六个年龄段:中生代和晚古生代峰值年龄为 137 Ma,255 Ma,312 Ma 和 482 Ma;出现 795 Ma 的新元古代峰值年龄;古元古代峰

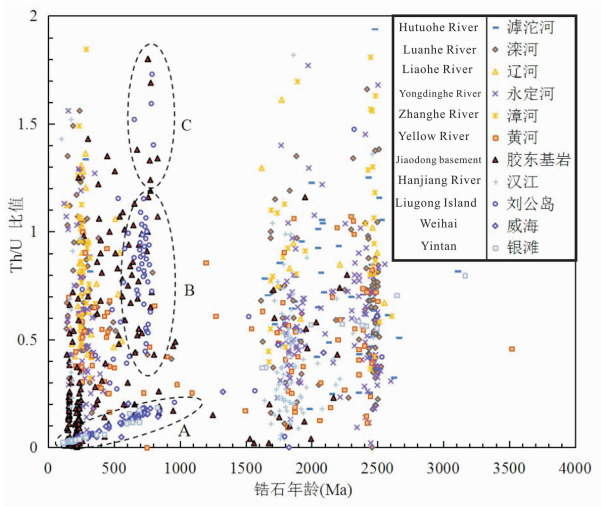


图 4 环渤海湾河流和海砂碎屑锆石
U-Pb 年龄与 Th/U 比二维散点图

Fig. 4 Two-dimensional scatter plots of U-Pb age and Th/U ratio of detrital zircons from fluvial and marine sediments around the Bohai Bay Basin

值为 1728 Ma 和 1851 Ma;新太古代峰值年龄为 2241 Ma 和 2409 Ma(图 5b)。永定河样品(YDH-1)锆石 U-Pb 年龄以中生代和晚古生代为主,分别出现 140 Ma 和 271 Ma 的峰值;古元古代年龄组分峰值年龄为 1792Ma;新太古代峰值年龄为 2352 Ma 和 2464 Ma(图 5c)。滦沱河样品(HTH-1)晚古生代峰值年龄为 305 Ma;古元古代年龄占主体,并出现多个峰值:1612 Ma,1824 Ma,1880 Ma;新太古代峰值年龄为 2120 Ma 和 2480 Ma;同时出现此次样品分析中最古老的锆石年龄 3110 Ma(图 5d)。威海样品(WHW-1)的中生代峰值年龄集中在 130 Ma 和 220 Ma,古生代峰值年龄集中在 323 Ma 和 432 Ma,并出现 595Ma 和 730Ma 两个新元古代峰值年龄(图 5e)。漳河样品(ZHH-1)晚古生代峰值年龄为 249 Ma 和 320 Ma;古元古代峰值年龄为 1640 Ma,1736 Ma 和 1832 Ma;新太古代峰值为 2312 Ma 和 2408 Ma(图 5f)。刘公岛样品(LGD-1)出现 225Ma、476Ma、555Ma、735Ma 的峰值年龄(图 5j)。银滩(YT-1)样品的锆石峰值年龄相对单一(图 5l),主要出现中生代峰值年龄(157Ma)。这些海砂样品与滦河、永定河、滦沱河、漳河、黄河(图 5g)和朝鲜半岛河流(图 5h, i)最大的差异在于前者都缺乏古元古代和新太古代峰值年龄。

在图 6 中可以看到,朝鲜半岛的汉江和大同江的碎屑锆石 U-Pb 年龄组成相似性高,集中分布在一个区域内;华北克拉通内部河流和黄河下游的紧

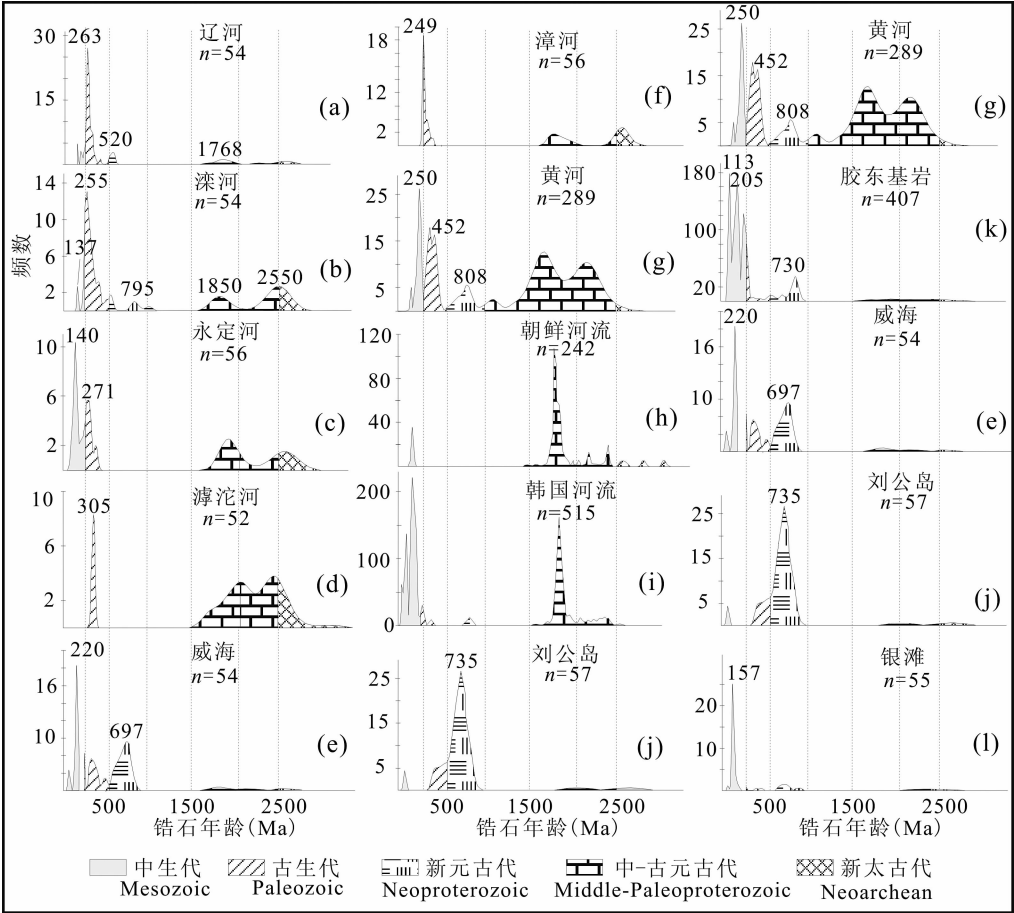


图 5 环渤海湾河流和海砂碎屑锆石 U-Pb 年龄频率布图

Fig. 5 U-Pb age frequency distribution map of fluvial and marine zircons around the Bohai Bay Basin

密程度高;威海的样品和胶东基岩、辽河的亲缘性更近。银滩和刘公岛的样品和上述区域均不在一个区域内,这主要因为受到近源单一岩体的影响,从而引起锆石 U-Pb 年龄组成相对单一,远离锆石 U-Pb 年龄组成复杂的区域。

部分钾长石颗粒的 CL 和反射光图像如图 7 所示。来自黄河(DM-1)的钾长石颗粒以次棱角或次圆为主;而刘公岛(LGD-1)和银滩(YT-1)的钾长石颗粒则以棱角状为主,说明其未经历长距离的搬运过程,以近源为主。此次分析的钾长石主量元素中,Na₂O、Al₂O₃、SiO₂和 K₂O 的含量高(表 1)。钾长石中 Na 和 K 元素的含量变化较大(Rhodes, 1969),在图 8a 中可清楚地看到 Na 与 K 含量呈负相关关系。三个样品的 SiO₂ 含量平均值范围为 62.9%~63.7%。二维散点图中 SiO₂ 与 K₂O 含量呈正相关关系(图 8b); Al₂O₃ 的平均含量分布在 19.3%~20.8 % 之间,这都与花岗岩中 SiO₂ (62.8%~65.8 %) 和 Al₂O₃ (17.8%~22.1%) 的含量分布范围接近(Zhang Hongfei et al., 2016),说

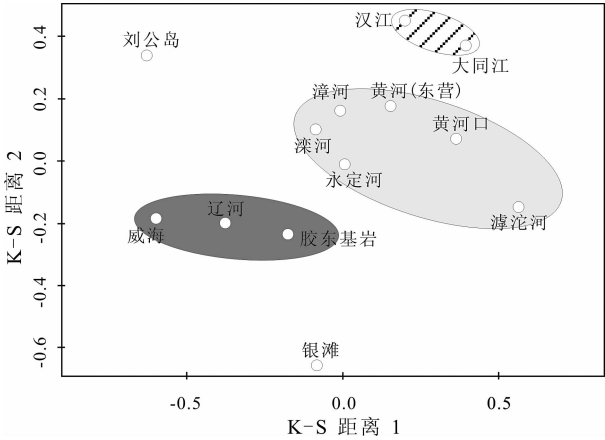


图 6 环渤海湾锆石 U-Pb 年龄之间的 K-S 距离 MDS 图，图中颜色分区与图 1 的河流流域颜色一致

Fig. 6 MDS plot showing the K-S distances between the zircon U-Pb ages, around the Bohai Bay Basin the color partition in the figure is consistent with the color of the river basin in figure 1

明在结晶过程中 Si⁴⁺、Al³⁺、K⁺ 离子共同进入硅酸盐矿物,成为硅酸盐矿物的主要成分。

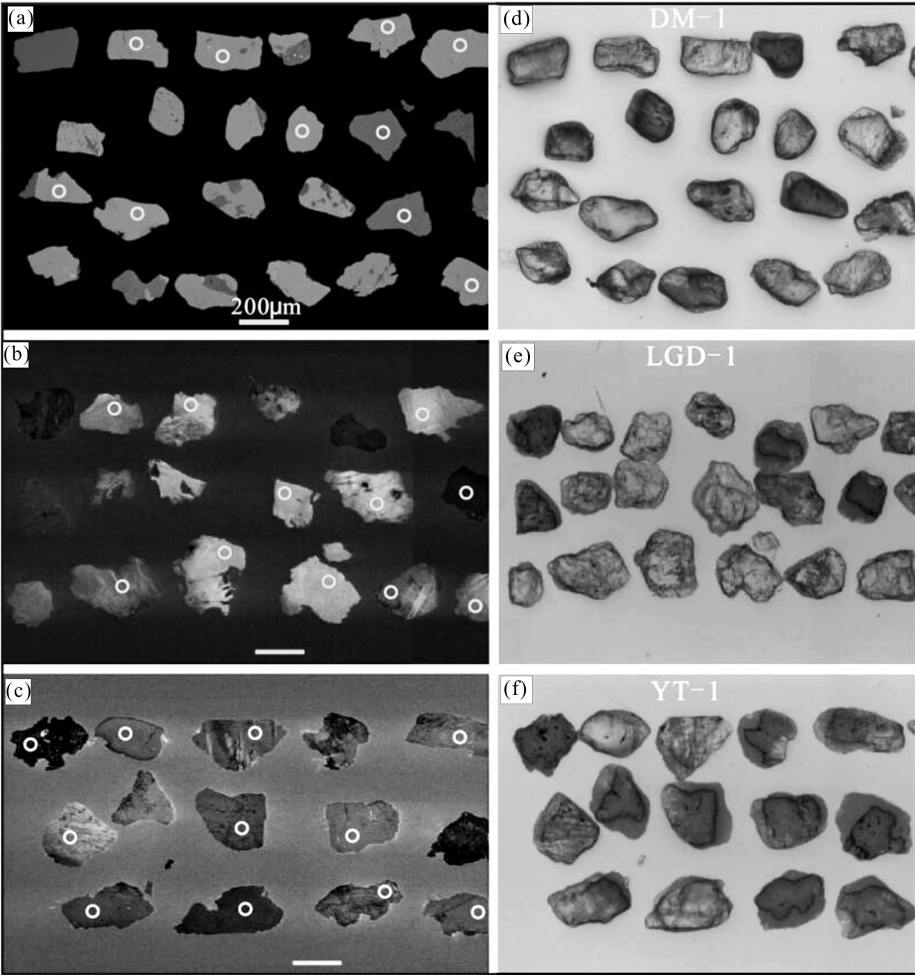


图 7 黄河 (DM-1)、刘公岛 (LGD-1) 和银滩 (YT-1) 部分钾长石背散射(a-c)和反射光(e-f)图像, 圆圈为样品分析点
Fig. 7 Representative blackscatter (a-c) and reflected light (e-f) images of K-feldspar grains from Yellow River, Liugong Island, and Yintan. Circles indicate analytical spots for major and trace elements dating

表 1 环渤海湾河流和海砂碎屑钾长石
LA-ICP-MS 数据统计表
Table 1 Descriptive statistics of LA-ICP-MS data
for K-feldspar grains from the fluvial
and marine sands from Bohai Bay Basin

	DM-1 (n=40)			LGD-1 (n=60)			YT-1 (n=60)		
	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均
K ₂ O	0.3	15.7	13.8	13.7	17.6	16.5	14.5	17.4	15.8
Na ₂ O	0.4	8.9	1.3	0.2	2.5	0.6	0.2	1.9	1.1
SiO ₂	59.7	64.7	63.7	62.1	63.8	62.9	61.9	64.0	63.3
Al ₂ O ₃	19.9	25.3	20.8	19.0	20.0	19.5	18.4	20.2	19.3
B	0.0	12.81	3.93	0.1	12.5	4.33	0.0	7.02	3.63
Zn	0.0	31.02	2.96	0.0	8.44	0.91	0.0	14.6	1.7
Ga	8.6	25.7	14.2	6.8	24.4	15.6	6.69	38.7	17.07
Sn	0.62	5.57	3.15	0.11	2.98	1.19	0.0	2.3	0.87
Rb	0.0	693	290	200	529	309	136	604	291
Sr	11	1779	832	17	754	290	25	1010	397
Pb	8.4	241	70	0.3	3.2	1.5	0.04	2.8	1.3
Ba	15	10660	5415	150	6753	2953	106	13661	2207

钾长石晶体富含 Rb、Sr、Ba 和 Pb 元素, Ga、Zn、Ga 和 Sn 元素的含量中等 (表 1)。

Rb⁺ 与 K⁺ 相比具有相同的电荷, 但离子半径较大, 按比例丰度容易进入含钾矿物晶格中 (Heier, 1962; Zhang Hongfei et al., 2016)。黄河样品中钾长石的 Rb 含量为 $0 \times 10^{-6} \sim 693 \times 10^{-6}$, 刘公岛为 $200 \times 10^{-6} \sim 529 \times 10^{-6}$, 银滩为 $136 \times 10^{-6} \sim 604 \times 10^{-6}$ (表 1), 分别形成各自的分布区域, 彼此间没有发生重叠 (图 8c)。Sr²⁺ 的电荷与 Pb²⁺ 相同, 离子半径大小接近, 很容易被钾长石从熔体中捕获。因而, 钾长石的 Sr 含量远高于其在花岗岩斜长石的含量 (Tulloch et al., 2013)。黄河样品的钾长石 Sr 含量在 $11 \times 10^{-6} \sim 1779 \times 10^{-6}$ 之间, 比刘公岛 ($17 \times 10^{-6} \sim 754 \times 10^{-6}$) 和银滩 ($25 \times 10^{-6} \sim 1010 \times 10^{-6}$) 的含量分布更分散 (图 8d)。Pb²⁺ 集中出现在含 K 矿物中, 如钾长石、黑云母和

白云母 (Heier, 1962)。刘公岛和银滩样品中钾长石的 Pb 元素含量明显低于黄河样品 (图 8e), 二者与黄河样品无重叠。Ba²⁺ 在钾长石早期结晶过程中被大量捕获 (Heier, 1962), 因而其在斜长石中的含量明显偏低。黄河钾长石颗粒的 Ba 含量范围为 $15 \times 10^{-6} \sim 10660 \times 10^{-6}$ (表 1)。刘公岛和银滩的样品分布范围在 $150 \times 10^{-6} \sim 6753 \times 10^{-6}$ 和 $106 \times 10^{-6} \sim 13661 \times 10^{-6}$ 之间。在二维散点图中 (图

8f), 黄河与刘公岛和银滩的样品没有出现明显的重叠区域。

4 讨论

通过对比碎屑锆石 U-Pb 年龄峰值、Th/U 比值、MDS 图、碎屑钾长石原位地球化学组成变化, 可以判别胶东半岛东部的威海湾和南部的银滩湾的物质来源。威海和刘公岛的碎屑锆石 U-Pb 峰值年龄

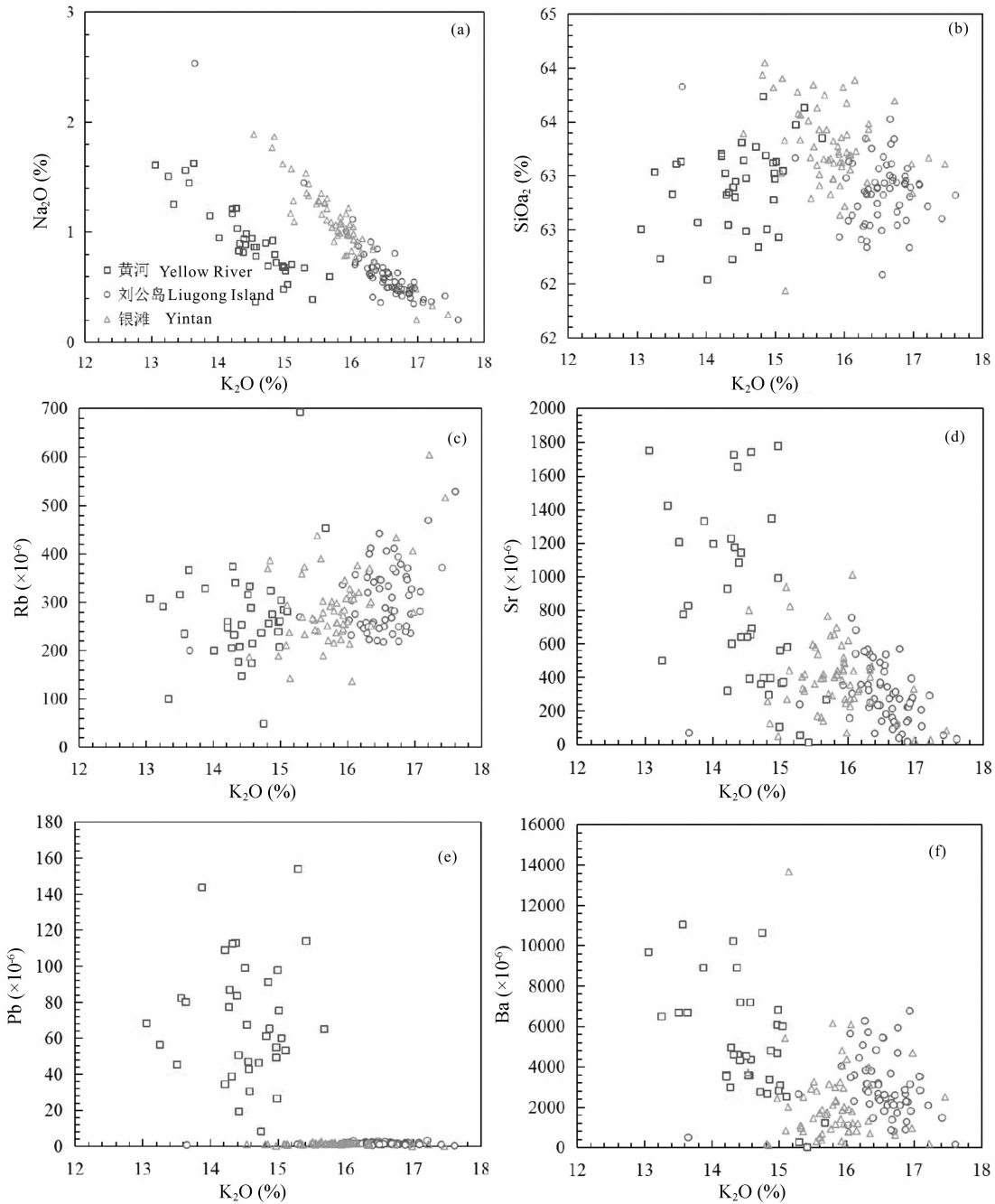


图 8 环渤海湾 Na₂O 和 K₂O(a), K₂O 和 SiO₂(b), Rb(c), Sr(d), Pb(e), Ba(f) 和 K₂O 含量二维散点图
Fig. 8 The representative major (a-b) and trace (c-f) elements against K₂O diagrams for K-feldspar grains around the Bohai Bay Basin

与辽河、滦河、永定河、滹沱河和漳河的差异在于,前者出现明显的新元古代峰值年龄,虽然新元古代峰值年龄在黄河和滦河下游样品中出现,但通过对比可以发现,这些河流样品(辽河除外)均出现明显的古元古代和新太古代峰值,而这些峰值年龄在威海湾的海砂中均不是主要峰值。同时,威海湾的海砂锆石 U-Pb 峰值年龄组成与朝鲜半岛北部和南部河流也截然不同,说明它们之间不存在物源关系。反而威海湾的海砂锆石 U-Pb 年龄组成与胶东半岛东部的基岩锆石 U-Pb 年龄组成相似(图 2, 图 5k)。银滩的碎屑锆石 U-Pb 峰值年龄和上述河流的锆石 U-Pb 年龄组成差别较大,而与银滩周边的基岩锆石 U-Pb 年龄组成更接近(图 2, 图 5l)。此外,如前所述,威海、刘公岛和银滩样品的锆石 Th/U 比值和胶东基岩的部分锆石 Th/U 比值接近,形成特定分布区域(图 4)。尽管还可以看到辽河、滦河、永定河、黄河的部分锆石颗粒落在这些分布区内,结合 MDS 图进一步判断(图 6),说明滦河、永定河和黄河物质并不是主要物源区。尽管在 MDS 图中辽河和威海、胶东基岩分布一个区域内,但辽河缺乏新元古代锆石峰值年龄,因而整体来看辽河并不是威海湾的物质供给河流。碎屑钾长石颗粒原位 Na_2O 和 SiO_2 与 K_2O 含量二维散点图的空间变化,进一步说明黄河与威海湾和银滩湾的物质没有物源关系。黄河样品中钾长石的 Rb、Sr、Pb、Ba 含量分布范围比胶东半岛样品的更广,揭示前者流域内物源区多,后者受单一物源区的影响更大。尤其是威海湾和银滩湾的钾长石原位 Pb 同位素含量比黄河口样品显著偏低,而没有发生重叠;通过钾长石 Pb 同位素比值研究($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$),胶东半岛与华北克拉通、秦岭造山带的分布范围明显不同(Zhang Ligang, 1992);胶东半岛内威海湾和银滩湾的砂级钾长石的外部形态特征以棱角状为主,暗示它们比黄河的搬运距离短(图 8),说明这些钾长石主要由近源源区提供,同时受区域内潮汐和海浪(台风)的分选影响,广泛堆积于海岸带。

胶东半岛的沿岸流对渤海物质进入黄海起重要作用(Liu Jian et al., 2001; Qiao Shuqing et al., 2017; Zhong Wei et al., 2020)。基于高精度的地震反射剖面,研究者在胶东半岛东部和东南部发现一个连续沉积的大型泥质沉积体(Liu Jian et al., 2001)。根据这些泥质沉积体的表面和钻孔的全岩微量(Liu Jian et al., 2009)、稀土(Liu Jian et al., 2009)以及重矿物(Li Jun et al., 2015)和粒度分析

(Li Wenjian et al., 2020),表明这些物质主要来自黄河,而近源河流的影响较小。这些泥质体在潮汐的作用下,再次搬运进入威海湾内(Zhong Wei et al., 2020)。胶东半岛南部青岛湾以东和银滩湾以西的较细沉积物主要来自黄河(Hu Gang et al., 2018)。但根据 U-Pb 锆石年龄对比,结合 MDS 图判断,Choi et al. (2013)发现黄河对黄海南部的砂级物质贡献率很小。通过对江苏沿海的沙脊进行碎屑锆石 U-Pb 年龄分析,Su Jinbao et al. (2017)发现这些物质主要来自长江,而黄河物质的影响并不显著。另外,由于黄河中游的植被保护和三门峡水库的调节作用,以及气候变化等原因,黄河输入到渤海的碎屑物总量自 2000 年以来显著降低(Li Li et al., 2020);渤海沉积物中只有 ~35% 的细粒物质继续搬运进入黄海,而砂级物质则大部分堆积在河流入海口的水下三角洲(Wu Chen, 2008; Wang Peng et al., 2014; Qiao Shuqing et al., 2017)。因此,相比细粒悬移物质,来自渤海的砂级物质很难扩散到黄海。因此,受胶东半岛近岸流和潮汐的影响,黄河细粒悬浮物在胶东半岛海湾物质中占主要部分,而粗粒物质主要来源于半岛附近的源区。因而,今后讨论中国东部陆架海的物质扩散问题时,应着重关注占沉积体主体部分的悬移物质。

5 结论

通过对辽河、滦河、永定河、滹沱河、漳河和黄河的碎屑锆石 U-Pb 年龄、Th/U 比值,与胶东半岛的威海湾和银滩湾进行对比,结合 MDS 图综合判断,发现它们之间不存在物源关系。碎屑钾长石原位地球化学元素分析结果也进一步证实作为渤海输沙量最大的河流,黄河与胶东半岛的威海湾和银滩湾没有源-汇关系。因而,胶东半岛北部和南部海湾的砂级物质主要来自当地近源源区。锆石和钾长石地球化学数据结果表明,可以从单颗粒锆石和钾长石原位中获得足够的物源信息,这对于今后中国北部陆架海的碎屑物质扩散、渤海湾盆地盆山耦合、大河演化等研究将提供新的途径。

References

- Adam J., Green T. H., Sie S. H., Ryan C. G. 1997. Trace element partitioning between aqueous fluids, silicate melts and minerals. *European Journal of Mineralogy*, 9(3): 569~584.
- Bea F., Pereira M. D., Stroth A. 1994. Mineral/leucosome trace-element partitioning in a peraluminous migmatite (a laser ablation-ICP-MS study). *Chemical Geology*, 117(1-4): 291~312.
- Blowick A., Haughton P., Tyrrell S., Holbrook J., Chew D., Shannon

- P. 2019. All mixed up; Pb isotopic constraints on the transit of sands through the Mississippi-Missouri River drainage basin, North America. *Bulletin*, 131(9-10): 1501~1518.
- Bracciali L, Parrish R R, Horstwood M S, Condon D J, Najman Y. 2013. U-Pb LA-(MC)-ICP-MS dating of rutile: New reference materials and applications to sedimentary provenance. *Chemical Geology*, 347: 82~101.
- Bureau H, Ménez B, Khodja H, Daudin L, Gallien J P, Massare D, Métrich N. 2003. The partitioning of barium and lead between silicate melts and aqueous fluids at high pressures and temperatures. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 210: 434~440.
- Carassai J J, Lavina E L C, Junior F C, Girelli T J. 2019. Provenance of Heavy Minerals for the Quaternary Coastal Plain of Southernmost Brazil (Rio Grande do Sul State). *Journal of Coastal Research*, 35(2): 295-304.
- Chen L R. 2008. Sediment mineralogy in China Sea. China Ocean Press, Beijing: 40~57.
- Choi T, Lee Y I, Orihashi Y, Yi H I. 2013. The provenance of the southeastern Yellow Sea sediments constrained by detrital zircon U-Pb age. *Marine Geology*, 337 182~194.
- Choi T, Lee Y I, Orihashi Y. 2016. Crustal growth history of the Korean Peninsula: Constraints from detrital zircon ages in modern river sediments. *Geoscience Frontiers*, 7(5): 707~714.
- Flowerdew M J, Tyrrell S, Riley T R, Whitehouse M J, Mulvaney R, Leat P T, Marshall, H R. 2012. Distinguishing East and West Antarctic sediment sources using the Pb isotope composition of detrital K-feldspar. *Chemical Geology*, 292: 88~102.
- Fyhn M B, Thomsen T B, Keulen N, Knudsen C, Rizzi M, Bojesen-Koefoed J, Abatzis I. 2019. Detrital zircon ages and heavy mineral composition along the Gulf of Tonkin-Implication for sand provenance in the Yinggehai-Song Hong and Qiongdongnan basins. *Marine and Petroleum Geology*, 101: 162~179.
- Gong L. 2014. Erosion situation and protection of beach in eastern part of Shandong Peninsula. Ocean university of China, Qingdao: 1~130(in Chinese with English abstract).
- Guo J, Chen F K, Zhang X M, Siebel W, Zhai M G. 2005. Evolution of syn- to post-collisional magmatism from north Sulu UHP belt, eastern China: zircon U-Pb geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4):1281~1301(in Chinese with English abstract).
- Guo R, Hu X, Garzanti E, Lai W, Yan B, Mark C. 2020. How faithfully the geochronological and geochemical signatures of detrital zircon, titanite, rutile and monazite record magmatic and metamorphic events? A case study from the Himalaya and Tibet. *Earth-Science Reviews*; in press.
- Hahn A, Miller C, Andó S, Bouimetarhan I, Cawthra H C, Garzanti E, Zabel M. 2018. The provenance of terrigenous components in marine sediments along the east coast of southern Africa. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(7): 1946~1962.
- Heier K S, Taylor S R. 1959. Distribution of Ca, Sr and Ba in southern Norwegian pre-Cambrian alkali feldspars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 17(3-4): 286~304.
- Heier K S. 1962. Trace elements in feldspars—a review. *Norsk geol. tidsskr*, 42(2): 415~454.
- Hu G, Xu K, Clift P D, Zhang Y, Li Y, Qiu J, Bi S. 2018. Textures, provenances and structures of sediment in the inner shelf south of Shandong Peninsula, western South Yellow Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 212: 153~163.
- Hong D, Jian X, Fu L, Zhang W. 2020. Garnet trace element geochemistry as a sediment provenance indicator: An example from the Qaidam basin, northern Tibet. *Marine and Petroleum Geology*, in press.
- Joseph V Smith, Brown W L. 1988. Feldspar Minerals: Crystal Structures, Physical, Chemical, and Microtextural Properties. Springer-Verlag, 1~840.
- Johnson S P, Kirkland C L, Evans N J, McDonald B J, Cutten H N. 2018. The complexity of sediment recycling as revealed by common Pb isotopes in K-feldspar. *Geoscience Frontiers*, 9(5): 1515~1527.
- Kong P, Jia J, Zheng Y. 2014. Time constraints for the Yellow River traversing the Sanmen Gorge. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(2): 395~407.
- Li S, Zhao G, Dai L, Liu X, Zhou L, Santosh M, Suo Y. 2012. Mesozoic basins in eastern China and their bearing on the deconstruction of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 64~79.
- Li S Zh, Suo Y, Li X, Zhou J, Santosh M, Wang P, Dai L. 2019. Mesozoic tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone to subduction of the Paleo-Pacific Plate. *Earth-science reviews*, 192: 91~137.
- Li G, Hu B, Li J, Bu R, Yang M, Dou Y. 2012. Geochemistry of major elements in the surface sediments of the offshore area of Shandong Peninsula and its geological implications. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 32(3): 45~54 (in Chinese with English abstract).
- Li J, Hu B, Zhao J, Dou Y, Wang L, Gao J, Zou L. 2015. Distribution pattern and controlling factors of heavy mineral assemblages in surficial seafloor sediments offshore of the Eastern Shandong Peninsula (Yellow Sea). *Environmental earth sciences*, 73(8): 4273~4285.
- Li L, Ni J, Chang F, Yue Y, Frolova N, Magritsky D, Walling D E. 2020. Global trends in water and sediment fluxes of the world's large rivers. *Science Bulletin*, 65(1): 62~69.
- Li W, Wang Z, Huang H. 2020. Indication of size distribution of suspended particulate matter for sediment transport in the South Yellow Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, in press.
- Lin Xu, Liu Jing, Peng Baofa, Li Chang'an, Wu Quanyuan. 2017. A review of low-temperature thermochronology on bedrock and detritus from rivers around the Tibetan Plateau. *Seismology and Geology*, 39(6): 1091~1110 (in Chinese with English abstract).
- Lin Xu, Liu-Zeng Jing. 2019. A review of mountain-basin coupling of Jiangnan and Dongting basins with their surrounding mountains. *Seismology and Geology*, 41(2): 499~520 (in Chinese with English abstract).
- Liou J G, Tsujimori T, Chu W, Zhang R Y, Wooden J L. 2006. Protolith and metamorphic ages of the Haiyangsuo Complex, eastern China: a non-UHP exotic tectonic slab in the Sulu ultrahigh-pressure terrane. *Mineralogy and Petrology*, 88(1-2): 207~226.
- Liu J P, Milliman J D, Gao S. 2001. The Shandong mud wedge and post-glacial sediment accumulation in the Yellow Sea. *Geo-Marine Letters*, 21(4): 212~218.
- Liu Y, Hu Z, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C, Chen H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1-2): 34~43.
- Liu J, Saito Y, Kong X, Wang H, Zhao L. 2009. Geochemical characteristics of sediment as indicators of post-glacial environmental changes off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea. *Continental Shelf Research*, 29(7): 846~855.
- Liu X C, Wu Y B, Fisher C M, Hanchar J M, Beranek L, Gao S, Wang H. 2017. Tracing crustal evolution by U-Th-Pb, Sm-Nd, and Lu-Hf isotopes in detrital monazite and zircon from modern rivers. *Geology*, 45(2): 103~106.
- Liu X, Qiao L, Zhong Y, Wan X, Xue W, Liu P. 2020. Pathways of suspended sediments transported from the Yellow River mouth to the Bohai Sea and Yellow Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, in press.
- Liu-Zeng J, Zhang J, Ge Y, Wang W, Zeng L, Li G, Lin X. 2019. A brief review of the interaction between tectonic, climatic and surface processes over multiple temporal and spatial scales.

- Acta Geologica Sinica-English Edition, 93: 151.
- McCarthy T S, Hasty R A. 1976. Trace element distribution patterns and their relationship to the crystallization of granitic melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40 (11): 1351~1358.
- Milliman J D, Farnsworth K L. 2013. River discharge to the coastal ocean: a global synthesis. Cambridge University Press, London: 1~393.
- Monnier L, Lach P, Salvi S, Melleton J, Bailly L, Beziat D, Gouy S. 2018. Quartz trace-element composition by LA-ICP-MS as proxy for granite differentiation, hydrothermal episodes, and related mineralization: The Beauvoir Granite (Echassières district), France. *Lithos*, 320: 355~377.
- O'Sullivan G, Chew D, Kenny G, Henrichs I, Mulligan D. 2020. The trace element composition of apatite and its application to detrital provenance studies. *Earth-Science Reviews*, in press.
- Patterson C, Tatsumoto M. 1964. The significance of lead isotopes in detrital feldspar with respect to chemical differentiation within the earth's mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(1): 1~22.
- Qiao S, Shi X, Wang G, Zhou L, Hu B, Hu L, Liu S. 2017. Sediment accumulation and budget in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea. *Marine Geology*, 390: 270~281.
- Rao W, Mao C, Wang Y, Su J, Balsam W, Ji, J. 2015. Geochemical constraints on the provenance of surface sediments of radial sand ridges off the Jiangsu coastal zone, East China. *Marine Geology*, 359: 35~49.
- Rhodes J M. 1969. On the chemistry of potassium feldspars in granitic rocks. *Chemical Geology*, 4(3-4): 373~392.
- Saito Y, Yang Z, Hori K. 2001. The Huanghe (Yellow River) and Changjiang (Yangtze River) deltas: a review on their characteristics, evolution and sediment discharge during the Holocene. *Geomorphology*, 41(2-3): 219~231.
- Su J, Rao W, Wang Y, Mao C. 2018. Detrital zircon geochronology of the radial sand ridge system of Jiangsu coast, east China: implication for sediment provenance. *Journal of Earth Science*, 29(1): 144~154.
- Tang J, Zheng Y F, Wu Y B, Gong B, Zha X, Liu X. 2008. Zircon U-Pb age and geochemical constraints on the tectonic affinity of the Jiaodong terrane in the Sulu orogen, China. *Precambrian Research*, 161(3-4): 389~418.
- Tyrrell S, Haughton P D W, Daly J S, Kokfelt T F, Gagnevin D. 2006. 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. *Journal of Sedimentary Research*, 76(2): 324~345.
- Tulloch A J, Palin M. 2013. Provenance of detrital feldspar: calibration of an LA-ICPMS trace element chemistry fingerprinting tool. *GNS Science*, 35: 1~24.
- Vermeesch P, Resentini A, Garzanti E. 2016. An R package for statistical provenance analysis. *Sedimentary Geology*, 336: 14~25.
- Wu Chen. 2008. Landform environment and its formation in North China. Science Press, Beijing: 1~551.
- Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, Liu X M, Guo J H, Zhai M G. 2007. Detrital zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the crustal evolution of North Korea. *Precambrian Research*, 159 (3-4): 155~177.
- Wang C, Dai J, Zhao X, Li Y, Graham S A, He D, Meng J. 2014a. Outward-growth of the Tibetan Plateau during the Cenozoic: A review. *Tectonophysics*, 621: 1~43.
- Wang P, Wu J Zh, Hu R J, Tan X J, Chen J. 2014b. Distribution and provenance of marine aggregates in Bohai Sea system. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 34(1): 145~152.
- Xu Y M, Jiang S Y. 2017. 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. *Terra Nova*, 29(6): 343~355.
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Belousova E, Griffin W L. 2008. Mesozoic decratonization of the North China block. *Geology*, 36 (6): 467~470.
- Yang J, Gao S, Chen C, Tang Y, Yuan H, Gong H, Wang J. 2009. Episodic crustal growth of North China as revealed by U-Pb age and Hf isotopes of detrital zircons from modern rivers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(9): 2660~2673.
- Yang Q, Santosh M, Shen J, Li S. 2014. Juvenile vs. recycled crust in NE China: Zircon U-Pb geochronology, Hf isotope and an integrated model for Mesozoic gold mineralization in the Jiaodong Peninsula. *Gondwana Research*, 25(4): 1445~1468.
- Zhai M, Bian A, Zhao T. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neoproterozoic and its breakup during late Palaeoproterozoic and Meso-Proterozoic. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 43(1): 219~232.
- Zhao G, Sun M, Wilde S A, San L. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177~202.
- Zhang L G. 1992. Block geology of East Asia lithosphere. Science Press, Beijing: 1~252 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J, Zhao Z F, Zheng Y F, Dai M. 2010. Postcollisional magmatism: geochemical constraints on the petrogenesis of Mesozoic granitoids in the Sulu orogen, China. *Lithos*, 119(3-4): 512~536.
- Zhang Hongfei, Gao Shan. 2016. Geochemistry. Geology Press, Beijing: 1~410 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xitao, Hu Daogong, Wu Zhonghai, Yang Xiaodong. 2017. Reviews on the research of late Cenozoic geology and environment of the Yangtze River delta area. *Journal of Geomechanics*, 23 (1): 1~64 (in Chinese with English abstract).
- Zhao R, Wang Q, Deng J, Santosh M, Liu X, Cheng H. 2018. Late Mesozoic magmatism and sedimentation in the Jiaodong Peninsula: New constraints on lithospheric thinning of the North China Craton. *Lithos*, 322: 312~324.
- Zhu R, Xu Y, Zhu G, Zhang H, Xia Q, Zheng T. 2012. Destruction of the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 55 (10): 1565-1587. China Craton: key issues revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177~202.
- Zhong W, Zhu L, Dong P, Hu R, Wu J, Zhu Y, Duan H. 2020. Mechanisms of sediment trapping in coastal embayments off the Shandong Peninsula in summer-A case study in Weihai Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 236: in press.
- China Geological Survey. 2004. Geological map of the People's Republic of China (1:2.5 million). China map publishing house, Beijing: 1.
- Zong K, Liu Y, Hu Z, Kusky T, Wang D, Gao C, Wang J. 2010. Melting-induced fluid flow during exhumation of gneisses of the Sulu ultrahigh-pressure terrane. *Lithos*, 120(3-4): 490~510.
- Zong K, Klemd R, Yuan Y, He Z, Guo J, Shi X, Zhang Z. 2017. 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). *Precambrian Research*, 290: 32~48.
- Zheng Ping, Li Dapeng, Chen Yuelong, Hou Kejun, Liu Changzheng. 2013. Zircon U-Pb Ages of Clastic Sediment from the Outfall of the Yellow River and Their Geological Significance. *Geoscience*, 27(1): 79~90.

参 考 文 献

- 陈丽蓉. 2008. 中国海沉积矿物学. 北京: 海洋出版社, 40~57.
- 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, 翟明国. 2005. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞—碰撞后构造过程: 锆石 U-Pb 年代学. *岩石学报*, 21(4): 1281~1301.
- 宫立新. 2014. 山东半岛东部海滩侵蚀现状与保护研究. 中国海洋大学, 青岛: 1~130.

林旭, 刘静, 彭保发, 李长安, 吴泉源. 2017. 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. 地震地质, 39(6):1091~1110.

林旭, 刘静. 2019. 江汉和洞庭盆地与周缘造山带盆山耦合研究进展. 地震地质, 41(2): 499~520.

吴忱. 2008. 华北地貌环境及其形成演化. 北京: 科学出版社, 1~551.

王鹏, 吴建政, 胡日军, 谭肖杰, 陈坚. 2014. 渤海海砂资源分布特征及物源分析. 海洋地质与第四纪地质, 34(1): 145~152.

赵希涛, 胡道功, 吴中海, 杨晓东. 2017. 长江三角洲地区晚新生代地质与环境研究进展述评. 地质力学学报, 23 (1):1~64.

张理刚. 1992. 东亚岩石圈块体地质. 北京: 科学出版社, 1~252.

张宏飞, 高山. 地球化学. 地质出版社, 北京: 1~410.

中国地质调查局. 2004. 中华人民共和国地质图(1: 250 万). 北京: 中国地图出版社, 1.

郑萍, 李大鹏, 陈岳龙, 侯可军, 刘长征. 2013. 黄河口河流沙碎屑沉积物锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 现代地质, 27(1):79~90.

Detrital zircon U-Pb ages and K-feldspar main and trace elements provenance studying from fluvial to marine sediments in northern China

LIN Xu¹⁾, LIU Jing²⁾, WU Zhonghai³⁾, WANG Shimei¹⁾, ZHAO Xitao⁴⁾,
CHEN Yong¹⁾, LI Zhaoning⁵⁾, LIU Haijin⁶⁾

- 1) China Three Gorges University, Yichang Hubei, 443002; 2) Tianjin University, Tianjin, 300072;
3) Institute of Geological Mechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081;
4) Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029;
5) Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029;
6) East China University of Technology, Nanchang Jiangxi, 330013
* Corresponding author: Lin Xu(hanwuji-li fe@163.com)

Abstract

A large amount of fluvial detrital sediments accumulate in the Bohai Bay Basin each year, however, it is not clear whether the sand-grade grains can migrate and spread to the gulfs of Jiaodong Peninsula, North China. Here we present 438 new concordant detrital zircon U-Pb ages from the Liao, Luan, Yongding, Hutuo, and Zhang rivers, as well as the marine sands from the Liugong Island, Weihai and Yintan bays of Jiaodong Peninsula. We also present a compilation of published bedrock and detrital zircon data from Jiaodong and Korean peninsulas to evaluate potential sediment source regions. The peak ages of zircons in marine sands are characterized by the presence of Neoproterozoic and the absence of Paleoproterozoic and Neoarchean peak ages. Combined with the Th/U ratios and MDS plot, we find that the detrital zircons from rivers in the North China Craton and Korean Peninsula are not the main provenance areas for sand-grade grains within the bays of Jiaodong Peninsula. These detrital sand-grade sediments are mainly from local source areas from the Jiaodong Peninsula. We also present 160 new *in situ* geochemical data on detrital K-feldspar grains from the Yellow River and Weihai and Yintan from the Jiaodong Peninsula to check the above results. By comparing the content change of main elements (NaO, K₂O, Al₂O₃) and trace elements (Rb, Sr, Pb, Ba), it can be clearly found that there are no provenance relationships among them. Therefore, the combination of detrital zircon and K-feldspar *in situ* geochemical analysis can become a potential provenance tool for studying material spreading in the marginal sea of North China, big river evolution and basin-mountain coupling of Bohai Bay Basin.

Key words: Bohai Sea; Jiaodong Peninsula; Zircon; U-Pb ages; K-feldspar; Element characteristics; Provenance