

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, doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2014.04.001

Jin Bingfu, Yue Wei, Wang Kunshan. Chemical composition of detrital amphibole in the sediments of the Huanghe River, Liao River and Yalu River, and its implication for sediment provenance[J]. Acta Oceanologica Sinica(in Chinese), 2014, 36(4): 11—21, doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2014.04.001

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

金秉福¹, 岳伟², 王昆山³

(1. 鲁东大学 地理与规划学院, 山东 烟台 264025; 2. 华东师范大学 河口海岸国家重点实验室, 上海 200062; 3. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 通过提取黄河、辽河和鸭绿江表层沉积物中的碎屑矿物角闪石, 对单矿物采用电子探针, 对群体角闪石采用 ICP-MS 和 ICP-AES 分析其常量元素及微量元素组成。结果表明: 角闪石单矿物主成分在一定范围内有较大变化, 都具有高 Si、Ca、Mg 和低 Na、K 的特征; 3 条河流的角闪石晶体化学都归属钙角闪石组, 半数以上矿物种为镁角闪石; 角闪石群体矿物化学显示黄河角闪石的稀土元素浓度明显高于黄土和黄河全岩沉积物, 而且重稀土比轻稀土更富集, 说明角闪石是黄河和黄土沉积物稀土元素的主要载体之一, 角闪石含量变化会对全岩样品稀土元素含量造成重要影响。微量元素特征显示新旧黄河样品间差别很小, 与其同一来源物质的事实相符。虽然黄河、辽河和鸭绿江河流样品角闪石主成分相近, 但微量元素方面(元素含量、元素含量对比值及特征值)显示较明显不同, 样品间多种数值指标相对偏差在 20% 以上, 可作为物源识别的判别标志, 如微量元素 Ba、Li、Rb、Cs、Ta、Tl、Pb、La、Ce、Pr、Nd 等含量的差异, 元素对比值 $c(\text{La})/c(\text{Y})$ 、 $c(\text{Sr})/c(\text{Rb})$ 、 $c(\text{Zn})/c(\text{Cu})$ 、 $c(\text{Gd})/c(\text{Cd})$ 、 $c(\text{Li})/c(\text{Be})$ 、 $c(\text{Rb})/c(\text{Cs})$ 、 $c(\text{Sr})/c(\text{Ba})$ 、 $c(\text{Hf})/c(\text{Ta})$ 、 $c(\text{Pb})/c(\text{Bi})$ 等的差异; 特征值 $\sum c(\text{REE})$ 、 $\sum c(\text{LREE})$ 、 $\sum c(\text{HREE})$ 、 $\sum c(\text{LREE})/\sum c(\text{HREE})$ 、 $[c(\text{La})/c(\text{Lu})]_N$ 、 $[c(\text{La})/c(\text{Yb})]_N$ 、 $[c(\text{La})/c(\text{Sm})]_N$ 等的差异。

关键词: 角闪石; 矿物化学; 物源; 河流

中图分类号: P736.21; P575.3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2014)03-0011-11

1 引言

国际洋陆边缘计划(NSF MARGINS Program)的“从源到汇”(source to sink)科学计划的核心科学目标是揭示世界陆源入海碎屑物质的通量和在大陆架地区的分布、搬运与扩散模式, 河流是世界陆源碎屑物质搬运入海的主要方式。中国东部边缘海陆源沉积

物, 主要来自于周边大陆入海河流的输送, 河源物质识别成为陆源碎屑沉积过程、沉积环境变化和沉积通量等研究不可回避的重要问题^[1-6]。入海碎屑物质主要来自中国大陆, 母岩区面积广阔, 区域地质条件较为复杂, 碎屑物质经过长期风化、剥蚀、搬运、混合后, 其物质组成及特征表现出一定相似性^[7-8], 造成海区沉积物物源区分困难。许多学者为此提出诸多

收稿日期: 2012-11-12; 修订日期: 2013-08-01。

基金项目: 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室开放基金资助项目(MASEG200803)。

作者简介: 金秉福(1963—), 男, 辽宁省大连市人, 教授, 主要从事海洋沉积地质学研究。E-mail: bfjin@126.com

识别方法,其中矿物学和地球化学是最常见的使用方法^[9-24]。碎屑矿物以其特定的矿物组合和特征矿物成为某一河流的矿物学标志,样品若取自于河床上,则可靠性较强。但是由于水动力分选,河流的不同地貌位置上矿物组合比例可能不同^[25-26],因此碎屑矿物方法在一定程度上会造成物源证据的不稳定性。元素地球化学以其简便易行、行之有效、区别指标多而颇受欢迎^[27-29],但也存在一些问题,如粒度效应^[30]、专属性不强以及容易受到人类活动干扰等^[31],因而在实际应用过程中也会受到一定限制。考虑到以上两种方法自身存在的缺陷,本文拟综合两者,从碎屑角闪石矿物元素地球化学分析着手,对我国北方海域沉积体系有重大影响的黄河、辽河和鸭绿江河源沉积物样品进行角闪石矿物化学特征对比分析,寻找它们的异同点,提出合适的物源识别指标。

利用碎屑重矿物的角闪石作为分析对象,主要基于如下考虑:(1)取材简易,角闪石是我国北方河流沉积物重矿物中最常见的种类^[25-26,32-33],通常占重矿物体积分数的1/3,甚至更高。角闪石显微镜下光学特征明显,易于与其他矿物区别,有利于样品的挑选。(2)重力分异小,同一河流,来源于不同岩石、不同流域的角闪石,在向河口搬运过程中,得到了充分混合,其比重相同、形态差异微小,粒度相同情况下不会随水动力变化而发生大的沉积分异作用,故可看作不受河流地貌位置的影响。虽然在不同样品的重矿物中角闪石的含量可能发生很大变化,但其种类构成比例基本不变。(3)由于广泛的类质同象,角闪石中元素种类众多^[34]、特别是微量元素种类多、含量高是其他碎屑矿物所不及的,尤其富含稀土元素;而且角闪石易在 HF 中溶解,地球化学测试难度小,精度高^[35]。(4)角闪石测试样品经过筛分,取自同一粒度,避免了粒度效应;沉积物中的角闪石皆为自然矿物,不可能由工业制造产生,根本上消除了人类活动的干扰。

2 样品与方法

2.1 黄河、辽河和鸭绿江自然概况

黄河是仅次于长江的中国第二长河,干流长 5 464 km,流域面积 $75.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。黄河含沙量是世界河流之最,按黄河利津水文站 1950—1999 年实测系列资料统计,黄河输入河口段多年平均年径流总量 $574 \times 10^8 \text{ m}^3$,多年平均年悬移质输沙量为 $8.67 \times 10^8 \text{ t}$,最大输沙量为 $21.0 \times 10^8 \text{ t}$ 。黄河中游流经的黄土高原,土壤疏松,植被覆盖率低,水土流失严重,是

黄河泥沙的主要来源区^[36](约占 90%)。

辽河是中国东北地区南部的最大河流,全长 1 430 km,流域面积 $22.9 \times 10^4 \text{ km}^2$,多年平均年径流量为 $126 \times 10^8 \text{ m}^3$,多年平均年输沙量为 $2 098 \times 10^4 \text{ t}$ 。流域内广泛分布岩浆岩、变质岩及松散碎屑物。流域西部主要分布着侏罗纪及白垩纪岩浆岩;流域东部广泛分布着古老的前寒武纪变质岩系。

鸭绿江发源于长白山,是中朝界河,干流长 795 km,流域面积 $6.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。鸭绿江属于雨雪混合补给型河流,多年平均年径流量为 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$,流域入海沙量为 $159 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。上游分布有新近纪和第四纪玄武岩台地,中下游主要分布着上元古界变质岩系。

2.2 样品采集

黄河样品于 2005 年 5 月 7 日(枯水期)取自山东垦利黄河段($37^{\circ}36.255' \text{ N}$, $118^{\circ}31.734' \text{ E}$,垦利浮桥处)和垦利东北的黄河故道(旧黄河)段($37^{\circ}48.395' \text{ N}$, $118^{\circ}40.657' \text{ E}$)。在现行黄河横剖面上,样品分别取在边滩、河漫滩和河床中心的表层,在黄河故道上,分别在边滩和废弃河床上取样,每个样品的质量为 2 kg 以上,本文以河床样作为实验对象。

鸭绿江样品于 2010 年 4 月 26 日(枯水期低潮时)取自丹东市鸭绿江河口段河床和边滩上,以两个采样点($40^{\circ}06'38.3'' \text{ N}$, $124^{\circ}22'47.7'' \text{ E}$ 和 $40^{\circ}06'11.8'' \text{ N}$, $124^{\circ}22'06.0'' \text{ E}$)沉积物中的角闪石为实验对象。

辽河样品于 2010 年 4 月 28 日(枯水期)取自盘锦市辽河河口段河床上,为了获得富集的重矿物测试样品,以取自于河床砂层中的两个样点($41^{\circ}11'07.0'' \text{ N}$, $122^{\circ}04'24.3'' \text{ E}$ 和 $41^{\circ}11'09.7'' \text{ N}$, $122^{\circ}04'24.3'' \text{ E}$)沉积物中的角闪石为实验对象。样品位置见图 1。

2.3 重矿物分离

碎屑矿物样品制备按照《我国近海海洋综合调查与评价专项技术规程》中有关海洋底质调查中的矿物分析方法的要求进行,取原始沉积物约 80 mL 放入小烧杯中,在 60° C 的干燥箱中恒温烘干,取干质量 100 g 左右,用自来水在 0.125 mm 和 0.063 mm 套筛中直接冲洗进行筛分,筛分后的沉积物再烘干和称质量(电子天平,分度值 $d=0.000 \text{ 1 g}$),获得鉴定样粒级(极细砂)在沉积物中的百分含量。将 0.125~0.063 mm 粒级干样放入重液 CHBr_3 中(体积质量范围 $d_{4}^{20}=2.889\sim 2.891$)进行分离实验,矿物分离室温为 $(20 \pm 1)^{\circ} \text{ C}$,每 15 min 搅拌一次,共 3 次。静置 8 h 以后,将轻、重矿物分别取出,冲洗、烘干和称质量,最终获得轻、重碎屑矿物鉴定样品,并可计算得到重矿物的

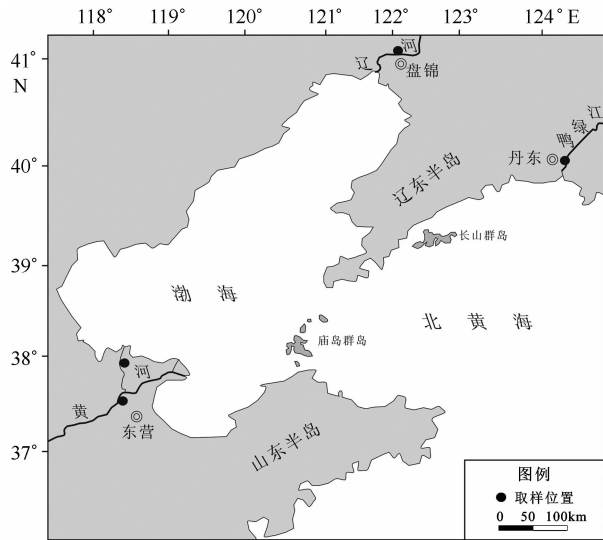


图1 样品位置示意图

百分含量。

2.4 角闪石分选

将 2 g 左右重矿物样品再放入二碘甲烷(CH_2I_2 , $d_4^{20} = 3.32$)进行角闪石浮选,实验过程同重矿物分离。将所获得的悬浮在二碘甲烷之上的样品在双目实体显微镜下进行角闪石手工挑选。挑选时将所取样品中的所有角闪石都挑选出来,主要是普通角闪石,再将风化强烈、蚀变严重的角闪石剔除,也剔除少量疑似角闪石无色或淡浅色颗粒,挑选的角闪石总量多于 50 mg。

2.5 角闪石单矿物化学分析

详细的单矿物成分分析,由中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室的 JEOL JXA8100 型电子探针仪测定。测试条件:加速电压 15 kV,探针电流 20 nA、束斑直径 1 μm ,ZAF 修正法;标样采样美国 SPI 公司的硅酸盐矿物及氧化物标样。各元素的分析时间为:Si、Mg、Al、Fe、Ca、Mn 皆为 30 s,Na 为 10 s,K 为 12 s,Ti 为 60 s。每组沉积物样选取角闪石 200 颗,随机测试 30~50 个颗粒,以保证其统计精度。

2.6 角闪石群体矿物化学分析

准确称取所选角闪石全部样品于可溶性聚四氟乙烯管型瓶中,加 3 mL 48% 的 HF、1 mL 71% 的 HNO_3 ,加盖密封,置于带孔电热板,185℃ 消解 48 h。冷却后,加 0.5 mL 85% 的 HClO_4 ,于 200℃ 蒸发至白烟冒尽,冷却后加 2 mL 71% HNO_3 、2 mL 水(18.3 M Ω),加盖密封,置于带孔电热板,120℃ 保温 12 h。

冷却后用水转移到 50 mL 塑料瓶中,定容到刻度,摇匀备测。

采用 ICP-MS(电感耦合等离子体质谱仪,型号:Thermo X Series 2)测微量元素;采用 ICP-AES(全谱直读电感耦合等离子体光谱仪,型号:IRIS Intrepid II XSP)测主量元素,由青岛海洋地质研究所实验室完成。检测依据:GB/T202602006,ICP 功率为 1 100 W,取样锥孔径为 1.0 mm,冷却气流量为 13.0 L/min,截取锥孔径为 0.7 mm,辅助气流量为 0.7 L/min,采集时间为 40 s,雾化气压力为 0.2 MPa,扫描次数为 40 次;射频功率为 1 150 W,分析泵速为 100 r/min,雾化气流为 25 PSI,辅助气为 0.51 pm。

3 结果与讨论

3.1 角闪石重矿物特征与物源分析

黄河沉积物重矿物组合是普通角闪石+绿帘石+褐铁矿,云母为特征矿物,其他常见的矿物,如透闪石、阳起石、石榴子石、榍石、钛铁矿等含量不高,相对含量变化不大(见表 1)。角闪石以普通角闪石占绝对优势,晶形以长柱状为主,次为短柱状,还含有少量粒状;半自形为主,(110)柱面解理发育;绿色(浅绿、深绿、黑绿色)、少量褐色;透明—半透明;玻璃光泽;次棱角状为主、少量次圆状和棱角状;少量有不同程度风化,个别风化较强烈;少量有一定蚀变,多变成绿泥石、绢云母等。普通角闪石偏光镜下呈二级蓝绿干涉色,多色性和吸收性较显著,正吸收,正延性,折射率中等($1.655 < N < 1.700$),消光角较小($c \wedge N_g = 20^\circ \sim 24^\circ$),二轴晶,负光性。

辽河沉积物重矿物组合为普通角闪石+绿帘石+石榴子石,特征矿物为石榴子石,含量较高,榍石、锆石有一定含量,少见云母,这与本文研究样品采自于河床重矿物富集的砂层有关。辽河沉积物中普通角闪石与黄河的类似,所不同的是辽河沉积物中普通角闪石磨圆度好,以次圆状居多,少部分甚至是圆状,这在其他河流沉积物中是很少见的,也有次棱角状的,总体蚀变不强。

鸭绿江的重矿物组合为普通角闪石+阳起石+黑云母,普通角闪石占重矿物总量的 1/2 以上,特征矿物为霓辉石和玄武闪石。鸭绿江普通角闪石矿物特征与黄河更为接近,呈柱状、扁柱状;绿色,偶有褐色,次棱角状,风化蚀变较弱。

3 条河流比较来看,虽然主要重矿物种类差别不大,但是它们最大的不同是其重矿物组合不同,黄河

是普通角闪石+绿帘石+褐铁矿,辽河是普通角闪石+绿帘石+石榴石;而鸭绿江是普通角闪石+阳起石+云母,说明其物质供给的不同。另外,3条河流特征矿物和微量矿物不同,矿物磨圆度也不同。在特征矿物和微量矿物含量上,黄河沉积物样品中黑云母含量高,风化较强,有些已转变为水黑云母;鸭绿江黑云母含量也高,但风化较轻微,呈次棱角状片状,沉积物中重矿物以普通角闪石为绝对组分,其他矿物含量都小于10%,而且岩屑和风化碎屑具有较高的含量;辽

河沉积物中石榴子石和楣石含量高,两者合计达27%,远远高出黄河和鸭绿江的在矿物磨圆度上,辽河沉积物中矿物的磨圆最好,普遍达次圆状,甚至圆状,其中包括不稳定矿物普通角闪石、绿帘石等;鸭绿江矿物磨圆最差,次棱角为主;黄河矿物由于来源广泛,磨圆程度虽然以次棱角状为主,但也有少量次圆状和棱角状。3条河流角闪石化学风化程度均较低,绝大部分保持新鲜状态,表面干净,很少有风化物附着,对矿物化学测试精度影响不大。

表1 黄河、辽河和鸭绿江河床和边滩主要碎屑重矿物平均体积分数(%)

样品来源	黄河(n=5)	黄河故道(n=2)	辽河(n=2)	鸭绿江(n=2)
普通角闪石	33.61	38.97	25.52	53.09
透闪石	1.78	2.48	0.48	2.69
阳起石	2.54	3.67	0.95	6.66
绿帘石	14.77	18.42	24.25	5.39
黑云母	6.19	2.37	0.00	5.86
水黑云母	3.53	1.66	0.00	1.90
石榴子石	4.80	4.96	21.08	2.38
楣石	2.55	1.31	6.02	1.58
钛铁矿	1.35	0.83	8.24	0.48
褐铁矿	15.75	12.73	4.91	4.28
其他重组分	13.13	12.63	8.56	15.69
合计	100	100	100	100

3.2 角闪石单矿物化学特征与物源分析

本次研究测试了4组共计150多个单矿物颗粒,经过成分比对,能够合理计算出角闪石分子式,获得有效数据的样品共137个,其中现行黄河河床的41个,垦利黄河故道(旧黄河)河床的28个,辽河的43个,鸭绿江的25个。采用以23个氧为标准,计算角闪石的阳离子系数,由化学计量限制估算其 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 平均值和相应的其他阳离子数值,产生了它们可能的晶体结构分子式以及有关的晶体化学特征数值^[37-38]。特征如下:

(1)关于常量元素变化,除CaO变化相对较小以外,其他8种氧化物都有较大幅度的变化(见表2)。其中 SiO_2 含量最高,绝大多数在43%~48%之间,集中分布在46%左右;CaO和MgO的含量高,绝大多数在10%以上,两者平均值均大于11%,MgO最高含量达22.13%。 TFe_2O_3 含量有高有低,总体相差中等,Fe在角闪石分子中既有 Fe^{3+} ,也有 Fe^{2+} ,其含量

对角闪石种类影响较大。 TiO_2 的含量较低,绝大多数小于1.5%,半数以上小于1.0%,最高值与最低值相差悬殊,最多相差84倍(鸭绿江)。代表碱性程度的 Na_2O 和 K_2O 的含量也不高,多数样品 Na_2O 含量范围0.8%~1.8%, K_2O 含量大多数小于1.0%。以上化学特征表明,3条河流的角闪石都具有高含量Si,高含量Ca、Mg,低含量Na、K的特征,虽然受角闪石骨干成分和晶格限制,但是单矿物之间常量元素含量依然相差较大,难以依据这一指标对沉积物进行物源区分。从 $c(CaO)/c(Na_2O)-c(Al_2O_3)/c(TiO_2)$ 散点图较明显表现出投影点的发散性(见图2),也表明每条河流角闪石单矿物常量元素地球化学并没有统一的共性形成区别特征。

(2)对于由电子探针测试数据计算而来的角闪石晶体结构式中的阳离子数值 $m(Si)$ 、 $m(IV Al)$ 、 $m(VI Al)$ 、 $m(Fe^{3+})$ 、 $m(Fe^{2+})$ 、 $m(Ti)$ 和特征值 $c(Mg)/[c(Mg)+c(Fe^{2+})]$ 、 $[c(Na)+c(K)]_A$ 以及 Ca_B 、

Ca_A,按照 Leake 等^[39]的最新角闪石分类方法^[40],得到角闪石的细分种类^[41]。结果表明,3条河流的角闪石都属于钙角闪石组,50%以上样品属于镁角闪石种,其他矿物种有浅闪石、铁浅闪石、韭闪石、镁绿钙闪石、铁韭闪石、阳起石、铁角闪石、镁钙闪石和绿钙闪石(表3)。通过几种晶体化学图件判别^[41],3条河流角闪石成因均以中酸性岩浆岩为主,其次是变质成因,生成火成角闪石的岩浆以壳幔混合源为主,幔源次之,变质成因的角闪石生成于中温中压以下的变质环境。

3.3 角闪石群体矿物化学特征与物源分析

将产在河口区的沉积物样品中的角闪石作为一个整体来进行地球化学分析,其数据既是这条河流所

含角闪石物质成分和比例的最终结果,也是河流入海物质中角闪石原始状态的反映,是示踪沉积物入海扩散的基础。角闪石群体矿物化学特征见表4,除Si未测试外,主要元素、大部分微量元素和稀土元素含量较高,适合作各种分析对比。

群体角闪石常量元素含量与单矿物电子探针测试结果的平均值相比相差不大(见表1,见图2),群体的Al₂O₃和TFe₂O₃含量稍偏低,而CaO、K₂O、MgO和Na₂O含量的稍偏高,对MnO含量两种测试最接近,仅TiO₂含量值偏差相对较大(群体的偏低),说明测试方法的选择对角闪石化学分析结果影响不大,分析数据是角闪石客观状况的直接反映,相对可信。

表2 黄河、辽河和鸭绿江沉积角闪石电子探针分析中主要元素含量(%)变化

主要元素的氧化物		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
黄河 n=41	最大值	53.74	2.09	12.04	21.42	0.64	22.13	12.74	1.83	1.90
	最小值	41.10	0.13	3.45	5.61	0.10	7.15	9.60	0.48	0.06
	平均值	46.19	0.84	8.38	14.40	0.30	12.50	11.90	1.16	0.86
黄河故道 n=28	最大值	54.90	2.03	11.60	22.67	0.68	16.39	12.73	1.76	1.65
	最小值	41.11	0.03	1.63	9.08	0.18	6.36	11.23	0.60	0.08
	平均值	46.21	0.91	8.24	16.38	0.36	11.28	11.95	1.16	0.87
辽河 n=43	最大值	51.72	2.53	12.84	22.19	0.56	16.36	12.53	2.20	1.79
	最小值	40.76	0.35	4.13	10.57	0.11	7.18	10.77	0.76	0.21
	平均值	45.28	0.99	9.29	15.82	0.32	11.53	12.02	1.31	0.96
鸭绿江 n=25	最大值	54.90	2.53	12.84	22.67	0.68	22.13	12.74	2.20	1.90
	最小值	40.76	0.03	1.63	5.61	0.10	6.36	9.60	0.35	0.06
	平均值	46.60	0.92	8.10	15.21	0.32	12.15	11.91	1.19	0.84

表3 黄河、辽河和鸭绿江沉积角闪石种类和含量(%;括号内为个数)

	黄河	黄河故道	辽河	鸭绿江
镁角闪石	58.54(24)	50.00(14)	58.14(25)	56.00(14)
浅闪石	14.63(6)	17.86(5)	13.95(6)	8.00(2)
韭闪石	4.88(2)	—	6.98(3)	4.00(1)
铁韭闪石	2.44(1)	3.57(1)	9.30(4)	4.00(1)
铁浅闪石	4.88(2)	7.14(2)	2.33(1)	8.00(2)
铁角闪石	2.44(1)	10.71(3)	2.33(1)	4.00(1)
镁绿钙闪石	7.32(3)	3.57(1)	4.65(2)	—
镁钙闪石	—	3.57(1)	2.33(1)	8.00(2)
绿钙闪石	—	—	—	4.00(1)
阳起石	4.88(2)	3.57(1)	—	4.00(1)
合计	100(41)	100(28)	100(43)	100(25)

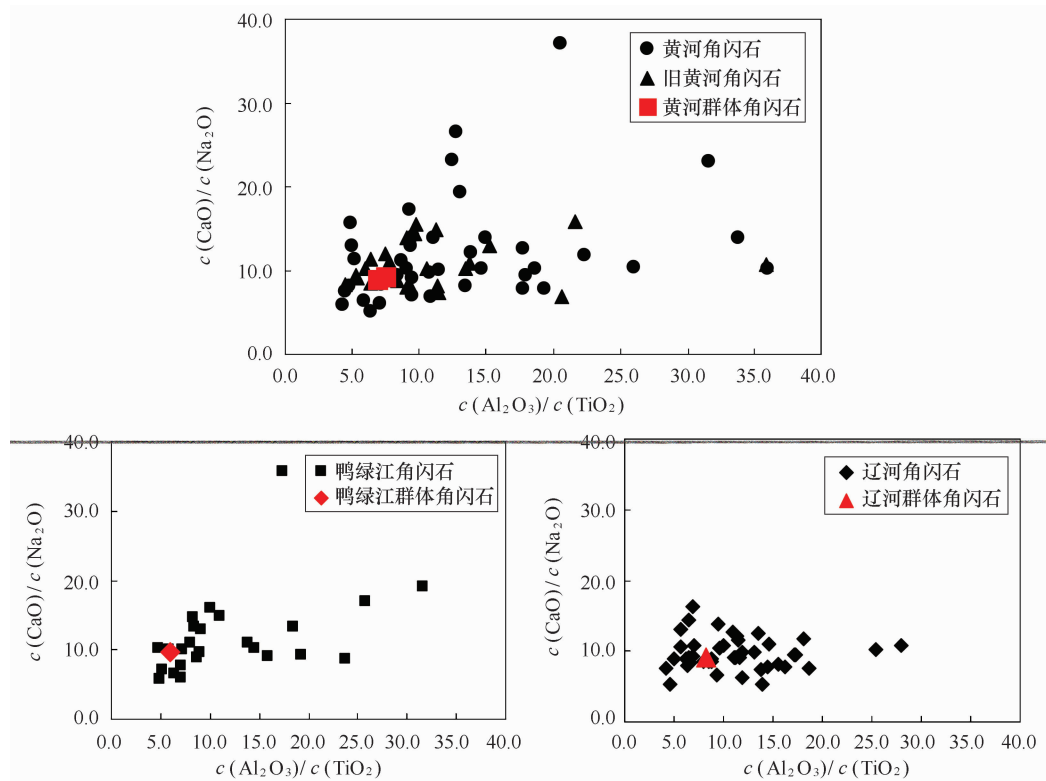


图2 黄河、辽河和鸭绿江沉积角闪石主成分 $c(\text{CaO})/c(\text{Na}_2\text{O})-c(\text{Al}_2\text{O}_3)/c(\text{TiO}_2)$ 散点图

从表4可以看出除了常量元素 Al、Fe、Mg、Ca、K、Na、Mn 和 Ti 参加角闪石晶格构建所必需的元素含量高以外,浓度在 10^{-4} 级的元素有 P、Cr、V 和 Zn 共4种;浓度在 10^{-5} 级别的元素最多,有 Ba、Sr、Cu、Ga、Li、Sc、Co、Ni、Rb、Y、Nb、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Gd 和 Dy,共18种;浓度在 10^{-6} 级别的元素次多,有 Be、Ge、Hf、Ta、W、Pb、Th、Eu、Tb、Ho、Er 和 Yb,共12种,其余几种元素浓度在 10^{-7} 级及其以下,说明角闪石所含元素种类和数量的复杂性。与中国花岗岩和中国东部粉砂岩相比^[42],除主元素外,角闪石中铁族元素和稀土元素明显偏高,而亲石分散元素 Rb、Ba、Sr 明显偏低。黄河、辽河和鸭绿江3条河流间角闪石元素含量和特征值在多方面存在较大的差异,是对3条河中元素成分进行物源对比的良好手段之一。

对不同成因的角闪石而言,其晶体化学特征差异明显,同时角闪石“硅氧骨干”之外空隙位置的阳离子的种类及其数量的变化也具有较显著的不同,这种不同并不会因为多来源角闪石的混合而使不同流域间的变得均匀一致,它们依然保持着不同流域各自的特性,具有专属性。

一般认为,沉积物中稀土元素主要来自于重矿物,而轻矿物主要起稀释作用。稀土元素是以类质同

象形式存在于矿物的晶格中^[43],角闪石具有复杂的类质同象,特别是三价和大半径阳离子众多,为稀土元素进入晶格创造了条件,稀土元素在角闪石中具有较高的分配系数^[44],是造岩矿物中含稀土元素最高的矿物相^[45],因而角闪石是稀土元素的重要载体。从球粒陨石标准化后的稀土元素分布型式上看(见图3),3条河流4组样品稀土元素,具有相近的分布型式,从轻稀土到重稀土是一个缓倾斜的状态,Ce有轻微的亏损 [$\delta c(\text{Ce}) \geq 0.92$],Eu则有中等程度亏损 [$\delta c(\text{Eu}) = 0.49 \sim 0.60$]。鸭绿江在这3条河流中稀土含量最高,轻稀土富集更明显,辽河稀土含量低,黄河居于中间。

很多研究者对黄土和黄河沉积物中的稀土元素进行过分析,本文用角闪石稀土元素含量与前两者稀土元素含量进行对比,结果表明:角闪石稀土元素含量比黄土和黄河沉积物稀土元素含量要高得多^[27-28],重稀土比轻稀土具有更高的倍数(见图4)。黄河沉积物中角闪石稀土元素含量与黄土稀土元素含量的比值约为1.2~2.5;与黄河沉积物稀土元素含量的比值高达1.4~3.3。考虑到稀土元素矿物如独居石、磷钇矿、褐帘石等在黄土和黄河重矿物中出现率非常低^[46],它们对稀土含量的贡献有限,由此认为

角闪石是黄土和黄河沉积物重要的稀土来源,虽然其他重矿物(如楣石)以及黏土矿物对沉积物稀土含量也具有不同程度的贡献,但角闪石以其在沉积物中的

含量高,毫无疑问应是黄土和黄河稀土元素的主要来源之一。

表4 黄河、辽河和鸭绿江角闪石群体矿物化学分析结果和特征值

元素及氧化物	鸭绿江	辽河	黄河	黄河故道	元素/特征值	鸭绿江	辽河	黄河	黄河故道
Al ₂ O ₃	9.44	9.87	9.92	10.00	La	61.6	18.1	41.6	45.4
TFe ₂ O ₃	17.65	17.41	17.14	17.04	Ce	127.0	49.9	88.5	98.1
CaO	9.89	11.13	10.68	10.49	Pr	17.31	8.40	12.73	13.93
K ₂ O	0.75	0.74	0.69	0.68	Nd	72.8	41.1	56.4	61.6
MgO	10.54	10.79	11.29	11.17	Sm	14.8	9.8	12.5	13.3
Na ₂ O	1.03	1.23	1.15	1.16	Eu	2.29	1.85	2.13	2.18
MnO	0.32	0.34	0.33	0.33	Gd	13.1	8.6	11.3	11.7
TiO ₂	1.57	1.20	1.33	1.45	Tb	1.99	1.42	1.83	1.82
P ₂ O ₅	0.081	0.041	0.073	0.077	Dy	11.8	8.8	11.3	10.7
Ba	121.4	65.6	97.4	91.1	Ho	2.35	1.77	2.28	2.16
Sr	116.3	96.3	97.9	102.6	Er	6.56	4.84	6.29	6.02
Cr	307	296	387	367	Tm	1.02	0.76	0.99	0.94
V	312.3	347.8	353.7	352.5	Yb	6.28	4.65	6.11	5.83
Zn	328.3	254.3	247.9	276.0	Lu	0.98	0.73	0.95	0.90
Cu	20.81	12.35	18.31	22.31	Σc(REE)	339.87	160.75	254.87	274.55
Ga	21.32	19.70	18.96	19.36	Σc(LREE)[(Σc(Ce))]	295.77	129.15	213.81	234.47
Cd	0.18	0.24	0.24	0.22	Σc(HREE)	44.11	31.59	41.05	40.08
Li	22.31	8.85	14.59	15.31	Σc(LREE)/Σc(HREE)	6.71	4.09	5.21	5.85
Be	2.52	1.97	2.18	1.96	Σc(Y)	102.20	74.70	95.37	93.50
Sc	65.2	66.2	70.1	70.8	Σc(Ce)/Σc(Y)	2.89	1.73	2.24	2.51
Co	45.7	47.8	47.0	47.8	[c(La)/c(Lu)] _N	6.52	2.58	4.54	5.24
Ni	83.3	91.7	93.4	95.5	[c(La)/c(Yb)] _N	6.62	2.62	4.59	5.25
Ge	3.52	3.15	3.02	3.19	[c(La)/c(Sm)] _N	2.62	1.15	2.10	2.15
Rb	20.8	5.92	8.60	8.54	[c(Gd)/c(Yb)] _N	1.68	1.50	1.50	1.62
Y	58.1	43.1	54.3	53.4	δc(Ce)	0.92	0.97	0.92	0.93
Nb	33.7	14.0	18.3	24.4	δc(Eu)	0.49	0.60	0.54	0.52
Mo	0.38	0.37	0.23	0.24	c(La)/c(Y)	1.06	0.42	0.77	0.85
Cs	1.02	0.32	0.66	0.64	c(Sr)/c(Rb)	5.58	16.26	11.39	12.01
Hf	5.63	3.89	4.12	4.50	c(Zn)/c(Cu)	15.78	20.59	13.54	12.37
Ta	2.12	1.00	1.40	1.44	c(Gd)/c(Cd)	120.09	82.82	78.04	86.97
W	2.27	0.73	0.98	1.53	c(Li)/c(Be)	8.84	4.50	6.70	7.82
Tl	0.115	0.045	0.063	0.066	c(Rb)/c(Cs)	20.42	18.38	13.03	13.34
Pb	9.76	4.53	6.80	5.96	c(Sr)/c(Ba)	0.96	1.47	1.01	1.13
Bi	0.12	0.14	0.19	0.17	c(Se)/c(Y)	1.12	1.53	1.29	1.33
Th	11.0	1.04	4.14	6.83	c(Hf)/c(Ta)	2.66	3.89	2.95	3.12
U	1.26	0.31	0.70	0.89	c(Pb)/c(Bi)	80.38	32.70	35.56	34.21

注:表中氧化物单位为(10⁻²);微量元素单位为g/g(10⁻⁶)。

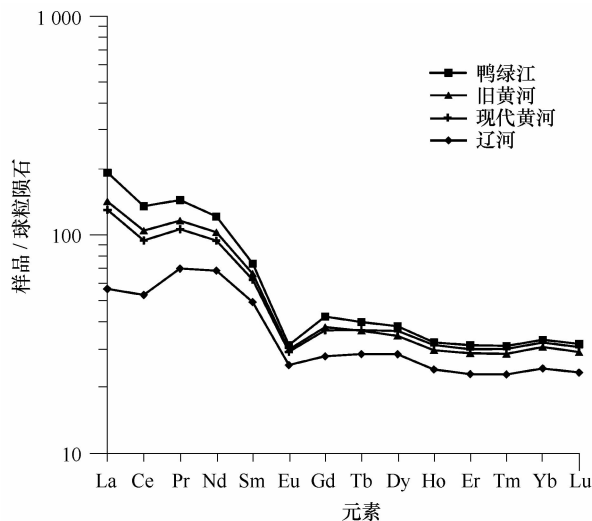


图3 3条河流沉积角闪石稀土元素配分型式图

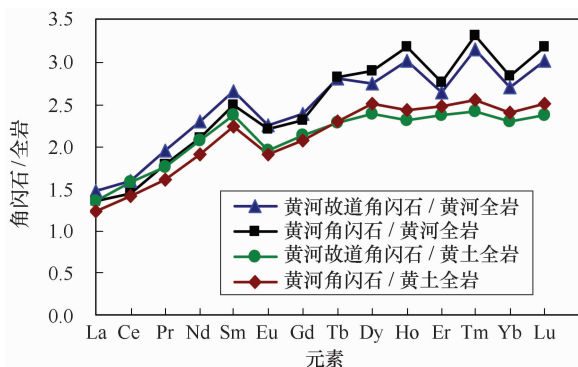


图4 黄河群体角闪石与黄河和黄土全岩稀土元素对比(黄河和黄土全岩样数据采用文献[31])

角闪石群体矿物的微量元素地球化学,是对3条河成分进行精细对比的良好手段,不仅指标多,而且差异性明显。表5例举了3条河流中角闪石群体矿物元素与部分元素特征值的相对偏差(RD),结果表明:

(1)新故黄河样品间元素含量相对偏差小, $RD > 20\%$ 的元素,仅有 Nb、W、Th 和 U,而后3种元素在

角闪石中含量仅为 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 量级,不排除仪器测试精度的可能影响,而含量高且地球化学活动性高的元素如 Ba、Sr、Rb 等以及所有稀土元素, RD 却很小,仅有几个百分点。特别是如 $\sum c(\text{LREE})/\sum c(\text{HREE})$ 、 $[c(\text{La})/c(\text{Lu})]_N$ 、 $[c(\text{La})/c(\text{Yb})]_N$ 、 $[c(\text{La})/c(\text{Sm})]_N$ 以及 $c(\text{La})/c(\text{Y})$ 、 $c(\text{Sr})/c(\text{Rb})$ 、 $c(\text{Hf})/c(\text{Ta})$ 等元素对和特征值, RD 都在 15% 以下,大部分为小于 10% 。由此确认,同一来源的沉积物,其角闪石群体矿物化学特征基本保持稳定,差异性很小,是辨识物源亲缘性的基础。

(2)黄河、辽河和鸭绿江3条河流间角闪石群体矿物元素含量和特征值在多方面存在较大的差异,在表4所例举的42种测试微量元素中,除 V、Ga、Sc、Co、Ni 和 Ge 6种元素差异较小外,其他36种元素均有 RD 大于 15% 的差异,大都差异明显, RD 达几十甚至上百,在元素特征值中除 $[c(\text{Gd})/c(\text{Yb})]_N$ 、 $\delta c(\text{Ce})$ 、 $\delta c(\text{Eu})$ 差别较小外,其他特征值和元素对比值,如 $\sum c(\text{LREE})/\sum c(\text{HREE})$ 、 $c(\text{Sr})/c(\text{Rb})$ 等19个指标都有相当大的差异,除表4例举之外,还可寻求多种元素或元素组合之间比值的差异性。可以确信,不同流域来源的沉积物,其角闪石群体矿物化学特征存在多方面的差异,差异性远远多于其共性,由这些差异性可以进行物源比对和识别。

(3)识别角闪石群体矿物化学物源指标是基于微量元素含量的基础上,元素在矿物中的浓度是流域中所有角闪石个体浓度的加权平均值,与角闪石的结晶成因密切相关,即只与物源有关,而与后期整个表生沉积作用关系不大,特别是稀土元素,在化学风化过程中相对惰性,不易迁移,以溶解方式进入河流的很少^[47-48]。3条河流间角闪石群体矿物微量元素含量和特征值的差异性不会随水动力分异、某些角闪石种的微量增减发生大的变化,研究工作难度相对要小于对碎屑矿物的鉴定和单矿物电子探针测试,并且差异性显著,容易辨识。

表5 黄河、辽河和鸭绿江角闪石群体矿物元素与特征值的相对偏差(RD)

元素	鸭绿江 与黄河	鸭绿江 与辽河	辽河与 黄河	黄河新 旧之间	元素/ 特征值	鸭绿江 与黄河	鸭绿江 与辽河	辽河与 黄河	黄河新 旧之间
P	10.91	66.56	56.68	6.13	Sm	16.98	40.06	23.48	6.21
Ba	21.96	59.66	38.98	6.65	Eu	7.12	21.05	13.98	2.34
Sr	17.20	18.86	1.67	4.71	Gd	14.32	41.22	27.30	3.27
Cr	22.87	3.97	26.79	5.41	Tb	8.44	33.40	25.14	0.74
V	12.41	10.73	1.69	0.33	Dy	4.88	29.17	24.37	5.23

续表 5

元素	鸭绿江 与黄河	鸭绿江 与辽河	辽河与 黄河	黄河新 旧之间	元素/ 特征值	鸭绿江 与黄河	鸭绿江 与辽河	辽河与 黄河	黄河新 旧之间
Zn	27.93	25.41	2.56	10.74	Ho	3.00	28.37	25.43	5.39
Cu	12.80	51.02	38.86	19.70	Er	4.31	30.23	26.01	4.27
Ga	11.68	7.88	3.81	2.05	Tm	3.19	29.83	26.70	5.27
Cd	31.15	29.07	2.13	8.79	Yb	2.70	29.83	27.18	4.72
Li	41.82	86.40	49.00	4.80	Lu	3.26	29.88	26.68	5.38
Be	14.65	24.68	10.12	10.69	$\Sigma c(\text{REE})$	28.59	71.56	45.29	7.43
Sc	7.22	1.40	5.83	1.00	$\Sigma c(\text{LREE})[\Sigma c(\text{Ce})]$	32.16	78.42	49.37	9.21
Co	2.66	4.45	1.78	1.82	$\Sigma c(\text{HREE})$	7.17	33.06	26.05	2.41
Ni	11.43	9.61	1.83	2.27	$\Sigma c(\text{LREE})/\Sigma c(\text{HREE})$	25.14	48.51	24.10	11.61
Ge	15.18	11.11	4.09	5.29	$\Sigma c(\text{Y})$	6.91	31.09	24.31	1.99
Rb	83.14	111.46	36.86	0.63	$\Sigma c(\text{Ce})/\Sigma c(\text{Y})$	25.39	50.40	25.84	11.20
Y	6.72	29.62	23.01	1.68	$[c(\text{La})/c(\text{Lu})]_{\text{N}}$	35.68	86.42	54.98	14.19
Nb	59.09	82.77	26.98	28.42	$[c(\text{La})/c(\text{Yb})]_{\text{N}}$	36.22	86.46	54.50	13.53
Mo	47.60	1.57	46.12	2.89	$[c(\text{La})/c(\text{Sm})]_{\text{N}}$	22.21	77.68	57.97	2.62
Cs	42.93	104.02	68.77	2.99	$[c(\text{Gd})/c(\text{Yb})]_{\text{N}}$	11.63	11.76	0.13	7.98
Hf	30.86	36.57	5.88	8.79	$\delta c(\text{Ce})$	0.45	4.95	5.40	1.32
Ta	41.02	71.77	33.19	3.39	$\delta c(\text{Eu})$	8.81	19.90	11.14	2.68
W	79.51	102.48	28.84	44.13	$c(\text{La})/c(\text{Y})$	32.32	86.63	58.40	10.49
Tl	58.98	87.87	33.19	4.33	$c(\text{Sr})/c(\text{Rb})$	68.39	97.74	35.24	5.34
Pb	35.84	73.19	39.97	13.12	$c(\text{Zn})/c(\text{Cu})$	15.26	26.47	41.31	9.01
Bi	44.56	13.17	31.86	9.25	$c(\text{Gd})/c(\text{Cd})$	42.44	36.73	5.94	10.83
Th	90.53	165.29	119.45	48.89	$c(\text{Li})/c(\text{Be})$	27.60	65.20	39.37	15.47
U	57.36	121.28	77.38	24.45	$c(\text{Rb})/c(\text{Cs})$	44.16	10.48	34.07	2.36
La	38.83	109.24	78.77	8.82	$c(\text{Sr})/c(\text{Ba})$	4.81	41.99	37.36	11.36
Ce	35.71	87.26	55.91	10.23	$c(\text{Se})/c(\text{Y})$	13.93	30.99	17.25	2.68
Pr	30.49	69.26	40.94	9.04	$c(\text{Hf})/c(\text{Ta})$	10.50	37.67	27.44	5.40
Nd	25.37	55.58	31.31	8.85	$c(\text{Pb})/c(\text{Bi})$	77.32	84.33	8.38	3.88

注:RD等于样品A与样品B含量之差的绝对值除以他们之和乘以 $2 \times 100\%$;当 $RD < 15\%$ 时,数据间差异较小;当 $RD = 15\% \sim 20\%$ 时,数据间差异中等;当 $RD > 20\%$ 时,数据间差异显著,表中数字用黑体表示差异显著。

4 结论

(1)黄河、辽河和鸭绿江沉积物中重矿物都是以普通角闪石含量为最高,角闪石晶体化学都归属钙角闪石组,半数以上矿物种为镁角闪石。

(2)3条河流中角闪石个体内部常量元素地球化学有很大的不同,但都具有高含量Si、Ca、Mg,低含量Na、K的特征。

(3)角闪石群体矿物微量元素含量在新旧黄河之间相对偏差小,物源亲缘性强;在黄河、辽河和鸭绿江3条河流间相对偏差大,足以进行有效的区分,可以进行物源鉴定。

(4)3条河流间,利用角闪石群体矿物微量元素

地球化学进行物源识别的指标多,Ba、Li、Rb、Cs、Ta、Tl、Pb、La、Ce、Pr、Nd等含量差异显著; $c(\text{La})/c(\text{Y})$ 、 $c(\text{Sr})/c(\text{Rb})$ 、 $c(\text{Zn})/c(\text{Cu})$ 、 $c(\text{Gd})/c(\text{Cd})$ 、 $c(\text{Li})/c(\text{Be})$ 、 $c(\text{Rb})/c(\text{Cs})$ 、 $c(\text{Sr})/c(\text{Ba})$ 、 $c(\text{Hf})/c(\text{Ta})$ 、 $c(\text{Pb})/c(\text{Bi})$ 等元素对比值差异明显;特征值 $\Sigma c(\text{REE})$ 、 $\Sigma c(\text{LREE})$ 、 $\Sigma c(\text{HREE})$ 、 $\Sigma c(\text{LREE})/\Sigma c(\text{HREE})$ 、 $[c(\text{La})/c(\text{Lu})]_{\text{N}}$ 、 $[c(\text{La})/c(\text{Yb})]_{\text{N}}$ 、 $[c(\text{La})/c(\text{Sm})]_{\text{N}}$ 等差异醒目,这些都是重要物源判别指标。

致谢:本文的电子探针测试得到中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室以及钟军伟博士的大力协助;角闪石元素 ICP-MS 和

ICP—AES 测试得到青岛海洋地质研究所实验室和 内工作,宋键、刘春暖、官立新、牛洪燕、王凤等先后参
林学辉先生的支持,在此深表谢意! 本文的野外和室 加,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] Burbank D W. Causes of recent Himalayan uplift deduced from depositional patterns in the Ganges basin[J]. *Nature*,1992,357: 680—683.
- [2] Hori K,Saito Y,Zhao Q H,et al. Sedimentary facies and Holocene progradation rates of the Changjiang (Yangtze) delta,China[J]. *Geomorphology*,2001,41: 233—248.
- [3] 蒋东辉,高抒. 海洋环境沉积物输运研究进展[J]. *地球科学进展*,2003,18(1):100—108.
- [4] 刘健,朱日祥,李绍全,等. 南黄海东南部冰后期泥质沉积物中磁性矿物的成岩变化及其对环境变化的响应[J]. *中国科学: D 辑*,2003,33(6): 583—592.
- [5] LOICZIPO. Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone Science Plan and Implementation Strategy (IGBP Report51/IHDP Report18)[G]. Stockholm: IGBP Secretariat,2005.
- [6] 徐家声,孟毅,张效龙,等. 晚更新世末期以来黄河口古地理环境的演变[J]. *第四纪研究*,2006,26(3):327—333.
- [7] 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社,1985.
- [8] 秦蕴珊,赵一阳,陈丽蓉,等. 黄海地质[M]. 北京: 海洋出版社,1989.
- [9] 申顺喜,陈丽蓉,徐文强. 黄海沉积物中的矿物组合及其分布规律的研究[J]. *海洋与湖沼*,1984,15(3):240—250.
- [10] 王先兰,马克俭,陈建林,等. 东海沉积物碎屑矿物特征的研究[J]. *中国科学: B 辑*,1985,(5):474—482.
- [11] Cullers R L,Barrett T,Carlson R,et al. REE and mineralogical changes in Holocene soil and stream sediment[J]. *Chem Geol*,1987,63: 275—297.
- [12] Cullers R L,Basu A,Suttner L J. Geochemical signature of provenance in sand-size mineral in soil and stream near the tobacco root batholith, Montana, USA[J]. *Chem Geol*,1988,70:335—348.
- [13] Morton A C. Geochemical studies of detrital heavy minerals and their application to provenance research[M]. *Geological Society Special Publication*,1991,57: 31—45.
- [14] Derkachev A N,Nikolaeva N A. Associations of heavy minerals in sediments of western part of South China Sea[J]. *Geology*, 1999,14(4): 503—534.
- [15] 杨守业,李从先,张家强. 苏北滨海平原全新世沉积物物源研究——元素地球化学与重矿物方法比较[J]. *沉积学报*,1999,17(3):458—463.
- [16] 金秉福,林振宏,杨群惠,等. 沉积矿物学在陆缘海环境分析中的应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*,2002,22(3):113—118.
- [17] 王昆山,石学法,林振宏. 南黄海和东海北部陆架重矿物组合分区及来源[J]. *海洋科学进展*,2003,21(1):31—40.
- [18] 金秉福,林振宏. 东海外陆架 Q43 岩心末次冰期矿物学特征及其古环境意义[J]. *海洋学报*,2003,25(2):177—185.
- [19] Garcia D,Ravenne C,Marechal B,et al. Geochemical variability induced by entrainment sorting: quantified signals for provenance analysis[J]. *Sedimentary Geology*,2004,171: 113—128.
- [20] Morton A,Hallsworth C,Chalton B. Garnet compositions in Scottish and Norwegian basement terrains: a framework for interpretation of North Sea sandstone provenance[J]. *Marine and Petroleum Geology*,2004,21: 393—410.
- [21] Morton A C,Whitham A G,Fanning C M. Provenance of Late Cretaceous to Paleocene submarine fan sandstones in the Norwegian Sea: Integration of heavy mineral, mineral chemical and zircon age data[J]. *Sedimentary Geology*,2005,182: 328—343.
- [22] 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.
- [23] Mange M A,Morton A C. Geochemistry of heavy minerals[J]. *Developments in sedimentology*,2007,58: 345—391.
- [24] Bong W S K,Mastumura K,Yokoyama K,et al. Provenance study of early and middle bronze age pottery from Kaman—Kalehöyük, Turkey, by heavy mineral analysis and geochemical analysis of individual hornblende grains[J]. *Journal of Archaeological Science*,2010,37: 2165—2178.
- [25] 林晓彤,李巍然,时振波. 黄河物源碎屑沉积物的重矿物特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*,2003,23(3):17—21.
- [26] 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.
- [27] 赵一阳,鄢明才. 黄河、长江、中国浅海沉积物化学元素丰度比较[J]. *科学通报*,1992,13:1202—1204.
- [28] 杨守业,李从先. 长江与黄河现代表层沉积物元素组成及其示踪作用[J]. *自然科学进展*,1999,9(10):930—937.
- [29] 杨守业,李从先, Lee C B,等. 黄海周边河流的稀土地球化学及沉积物物源示踪[J]. *科学通报*,2003,48(11):1233—1236.
- [30] 赵一阳,鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社,1994.
- [31] 刘明,范德江. 近 60 年来长江水下三角洲沉积地球化学记录及其对人类活动的响应[J]. *科学通报*,2010,55(36):3506—3515.
- [32] 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.
- [33] Morton A C,Hallsworth C R. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones[J]. *Sedimentary Geology*,1999, 124: 3—29.
- [34] Lee J I,Clift P D,Layne G D,et al. Sediment flux in the modern Indus River inferred from the trace element composition of detrital amphibole grains[J]. *Sedimentary Geology*,2003,160: 243—257.

- [35] Sholkovitz E R. Rare earth elements in marine sediments and geochemical standards[J]. *Chemi Geol*,1990,88: 333—347.
- [36] Milliman J D,Beardsley R C,Yang Z S,et al. Modern Huanghe—derived mud on the outer shelf of the East China Sea: identification and potential transport mechanism[J]. *Contin Shelf Res*,1985,4: 175—188.
- [37] 林文蔚,彭丽君. 由电子探针分析数据估算角闪石、黑云母中的 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} [J]. *长春地质学院学报*,1994,24(2):155—162.
- [38] Schumacher John C. 角闪石电子探针分析数据中三价铁比值的估算[J]. *岩石矿物学杂志*,2001,20(2):189—207.
- [39] Leake B E,Woolley A R,Birch W D,et al. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association,commission on new minerals and mineral names[J]. *Mineralogical Magazine*,1997,61: 295—321.
- [40] IMA—CNMMN 角闪石专业委员会全体成员. 角闪石命名法[J]. *岩石矿物学杂志*,2001,20(1):84—100.
- [41] 金秉福,岳伟,王昆山. 黄河沉积中角闪石矿物晶体化学特征和成因分析[J]. *海洋学报*,2013,35(1):131—143.
- [42] 鄢明才,迟清华. 中国东部地壳与岩石的化学元素组成[M]. 北京:地质出版社,1997:1—292.
- [43] 刘劲鸿. 角闪石成因矿物族及其应用[J]. *长春地质学院学报*,1986(1):41—48.
- [44] 陈岳龙,杨忠芳,王忠刚. 东天山花岗岩矿物稀土元素地球化学及极限分配系数[J]. *地球科学—中国地质大学学报*,1999,24(3):265—268.
- [45] 李双保,管爱莲. 稀土元素地球化学对太古宙花岗岩类成因的判别[J]. *前寒武纪研究进展*,2000,23(2):76—87.
- [46] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社,1985:208—218.
- [47] 王中良,刘丛强,徐志方,等. 河流稀土元素地球化学研究进展[J]. *地球科学进展*,2000,15(5):553—558.
- [48] Gouveia M A,Prudêncio M I,Figueirido M O,et al. Behavior of REE and other trace and major elements during weathering of granitic rocks,Evora,Portugal[J]. *Chem Geol*,1993,107: 293—296.

Chemical composition of detrital amphibole in the sediments of the Huanghe River, Liaohe River and Yalu River, and its implication for sediment provenance

Jin Bingfu¹, Yue Wei², Wang Kunshan³

(1. College of Geography and Planning, Ludong University, Yantai 264025, China; 2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 3. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Abstract: Detrital amphiboles were separated from surface sediment samples obtained from the mainstream of the Huanghe River, Liaohe River and Yalu River. Chemical composition of individual amphiboles and amphibole population (sum of amphibole grains in a sample) were analyzed by electron microprobe analyzer, and ICP—MS, ICP—AES respectively. Results of electron microprobe analyzer show that calcium-amphibole group (more than half are magnesiohornblende) is dominated in the sediments of the three rivers according to their crystallochemical classification. The chemistry composition of individual amphiboles vary in a large extent, and with high Si, Ca, Mg, and low Na, K. Results from amphibole population geochemistry from the Huanghe River reveal significantly higher rare earth element (REE) concentrations than that in loess and whole-rock sediment. Hence, it could be concluded that amphibole is one of the main REE carriers of the Huanghe River sediments and loess deposits. The content changes of amphibole could largely influence the REE content fluctuations in the whole rock. Little difference in trace element content between the new and the abandoned Huanghe River samples possibly indicates the same provenance. Trace elements of amphibole population are significantly different in the three rivers, indicated by more than 20% of relative deviation in terms of some indexes. Some indicators can be used as typomorphic chemical characteristics of amphibole to trace sediments, such as trace elements of Ba, Li, Rb, Cs, Ta, Tl, Pb, La, Ce, Pr, Nd, element ratios of $c(La)/c(Y)$, $c(Sr)/c(Rb)$, $c(Zn)/c(Cu)$, $c(Gd)/c(Cd)$, $c(Li)/c(Be)$, $c(Rb)/c(Cs)$, $c(Sr)/c(Ba)$, $c(Hf)/c(Ta)$, $c(Pb)/c(Bi)$, and distinguished value of $\sum c(REE)$, $\sum c(LREE)$, $\sum c(HREE)$, $\sum c(LREE)/\sum c(HREE)$, $[c(La)/c(Lu)]_N$, $[c(La)/c(Yb)]_N$, $[c(La)/c(Sm)]_N$.

Key words: amphibole; mineral geochemistry; provenance; river