

碎屑石榴石地球化学物源分析与解释: 粒度的影响

黄鑫¹, 简星¹, 张巍¹, 洪东铭¹, 关平², 杜瑾雪³, 张鹏飞⁴

1. 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 海洋与地球学院, 福建厦门 361102

2. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 地球与空间科学学院, 北京 100871

3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

4. 长庆油田分公司坪北石油合作开发项目经理部, 陕西延安 717408

摘要 单矿物地球化学分析是沉积物源分析研究的重要手段, 运用广泛。沉积物中碎屑矿物的粒度组成, 即水动力分选作用, 是否影响到基于这种方法的物源解释, 目前尚不清楚且受到的关注不多。通过研究柴达木盆地北缘地区第三系沉积物中的 680 颗碎屑石榴石(0.068~0.557 mm) 的主量元素地球化学组成数据, 解释了不同粒度的碎屑石榴石物源。结果显示, 0.063~0.125 mm 的碎屑石榴石的地球化学结果中 Fe^{2+} 与 Mn^{2+} 含量更高, 表明其母岩的变质结晶程度较弱, 故物源解释结果更可能为中—低级角闪岩相变沉积岩, 而其他粒径的碎屑石榴石 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 含量更高, 这说明其物源区的温压条件较前者高, 因而物源解释结果为低级变质相, 中酸性火成岩, 榴辉岩等宽泛结果。这种碎屑石榴石粒度差异导致的地球化学组成的不同, 说明碎屑石榴石的颗粒大小在一定程度上会影响物源解释结果。因此, 在进行单矿物地球化学物源研究时, 选取特定粒径(0.063~0.125 mm 或 0.125~0.25 mm) 组成的碎屑矿物进行分析, 可以消除水动力分选作用的影响, 有助于获得更为准确的物源解释结果。

关键词 石榴石; 地球化学; 物源分析; 粒度

第一作者简介 黄鑫, 男, 1996 年出生, 本科, 沉积地球化学, E-mail: 22320152201003@stu.xmu.edu.cn

通信作者 简星, 男, 副教授, 沉积地球化学, E-mail: xjian@xmu.edu.cn

中图分类号 P548 P588.2 **文献标志码** A

0 引言

基于单矿物地球化学分析的物源研究, 最常见的如碎屑锆石 U-Pb 年代学^[1]、碎屑石榴石主量元素地球化学^[2-3]、碎屑金红石微量元素地球化学^[4], 一般随机分析一定数量的矿物颗粒, 使用所有样本地球化学数据的总体结果来反映碎屑沉积样品的源区性质。在该过程中, 碎屑矿物的粒度组成(即沉积水动力分选作用) 往往会被忽略, 其是否影响物源分析结果并不清楚。Yang *et al.*^[5] 对长江流域的碎屑锆石进行研究时, 提出了碎屑锆石的年龄与粒度存在反相关关系的看法, 即碎屑锆石的粒度越大, 其 U-Pb 年龄有变老的趋势; Malusà *et al.*^[6] 在对 Alps 的碎屑锆石进行年代学及热年代学研究时发现, 粒度会使结果产生较大误差; 与之相反, Sircombe *et al.*^[7] 在对加拿大西北部 Slave craton 的碎屑锆石进行 U-Pb 年代学研究时却认为粒度对于碎屑锆石的年龄没有影响; Triebold *et al.*^[8] 对 Alps 和 Erzgebirge 的碎屑金红石研究表明

金红石的地球化学信息不受粒度的影响。然而不同粒径的石榴石元素地球化学特征对物源解释结果是否存在影响, 目前尚无定论。

石榴石是常见的造岩矿物, 广泛存在于不同类型的沉积岩、变质岩及岩浆岩中。石榴石是砂岩中常见的重矿物, 在沉积、成岩过程中相对较为稳定^[9]。作为岛状结构硅酸盐矿物的重要类型, 石榴石晶体结构表现为孤立的硅氧四面体, 结构紧密。石榴石的化学表达为 $\text{X}_3\text{Y}_2[\text{SiO}_4]_3$, 其中 X 代表二价阳离子, 主要为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 等, 而 Y 代表三价阳离子, 主要为 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Cr^{3+} 等, 也可以有 Ti^{4+} 、 V^{3+} 、 Y^{3+} 等阳离子^[10]。石榴石中二价阳离子中的 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 具有较小的离子半径, 而 Ca^{2+} 离子半径较大, 因此 Ca^{2+} 难以与 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 形成类质同像, 这决定了石榴石中存在两种类型的类质同像系列: 铝质石榴石和钙质石榴石系列。铝质石榴石系列包括镁铝石榴石、铁铝石榴石和锰铝石榴石; 而钙质石榴石系列包括钙铝石榴石、钙铁石榴石和钙铬石榴石^[11-12]。

收稿日期: 2018-06-06; 收修改稿日期: 2018-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41806052); 福建省自然科学基金项目(2017J05067); 厦门大学校长基金项目(20720160114); 厦门大学大学生创新创业训练计划项目(2017X0642) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41806052; Natural Science Foundation of Fujian Province, No. 2017J05067; Xiamen University Fundamental Research Funds for the Central Universities, No.20720160114; XMU Training Project of Innovation and Entrepreneurship for Undergraduates, No. 2017X0642]

不同岩石来源的石榴石元素含量不同,如榴辉岩和基性麻粒岩中的石榴石往往具有高 Mg 和低 Ca 的特征;角闪岩相变泥质岩石中的石榴石往往是铁铝榴石;砂卡岩中产出的石榴石一般为钙铝榴石;锰铝榴石则主要产自于伟晶岩中^[13]。碎屑石榴石能够应用于沉积物源分析正是基于石榴石的地球化学多样性。例如,李任伟等^[14]利用镁铝榴石、钙铝榴石、铁铝榴石、锰铝榴石等端元的含量对合肥盆地的碎屑石榴石进行物源分析,最终判定物源区为大别造山带高压和超高压变质岩;卜香萍等^[15]应用碎屑石榴石对鲁西隆起区进行物源分析以及物源区构造演化示踪;Aubrecht *et al.*^[16]应用锰铝榴石—镁铝榴石—铁铝榴石和钙铝榴石—镁铝榴石—铁铝榴石两种三元图解进行 Czorsztyn 组的物源分析研究,并给出了不同于前人的物源解释结果。

石榴石的主量元素地球化学数据可利用电子探针获得,并且基于大量的地球化学数据,前人总结出了多个物源解释图解,来分析碎屑石榴石的母岩类型。主要包括如下:

(1) Morton *et al.*^[2]总结了大量的数据,利用源区包含高级变铁镁质岩石,高级麻粒岩相变泥质岩石和中低级变泥质岩石的现代河砂和海滩砂中的碎屑石榴石,提出了以 Ca^{2+} - Mg^{2+} - $Fe^{2+}+Mn^{2+}$ 为端元的适合于碎屑石榴石物源分析的判别图解模型(图 1a)。在

该模型中 Type A 表示低 Ca,高 Mg 的高级麻粒岩相变沉积岩、紫苏花岗岩等;Type B 表示低 Mg,可变 Ca 的角闪岩相变沉积岩,片岩,片麻岩等;Type C 表示高 Ca,高 Mg 的高级变基性岩如榴辉岩等。

(2) Mange *et al.*^[17]在此基础上,又对 Type B 和 Type C 的石榴石母岩解释图解进行了细分,Type B 分为 Type Bi,Type Bii,Type C 分为 Type Ci 和 Type Cii,并增加了 Type D 类型。其中 Type Bi 表示中酸性火成岩;Type Bii 表示低级角闪岩相变沉积岩;Type Ci 表示变基性(铁镁质);Type Cii 表示超基性岩;Type D 表示低级变基性岩。

(3) Aubrecht *et al.*^[16]在对 the Czorsztyn Unit (Pieniny Klippen Belt, Western Carpathians, Slovakia) 沉积物进行研究时,对所占组分较大的碎屑石榴石进行了地球化学成分测定,并提出了镁铝榴石(Mg^{2+})—铁铝榴石(Fe^{2+})—锰铝榴石(Mn^{2+}) (图 1b) 和镁铝榴石(Mg^{2+})—铁铝榴石(Fe^{2+})—钙铝榴石(Ca^{2+}) 两种三元判别图(图 1c)。在该模型中类型 B 表示高压和超高压岩石,类型 C1 表示榴辉岩和麻粒岩相岩石,类型 C2 表示角闪岩相岩石(可分为两个亚类 C1: 高级角闪岩相到麻粒岩相;C2: 角闪岩相,包括其他岩石,如蓝片岩、砂卡岩、蛇纹岩、火成岩等)。

(4) Teraoka *et al.*^[18-19]分析了日本西南九州东部小野川古生代,中生代砂岩和日本西南中部地区白

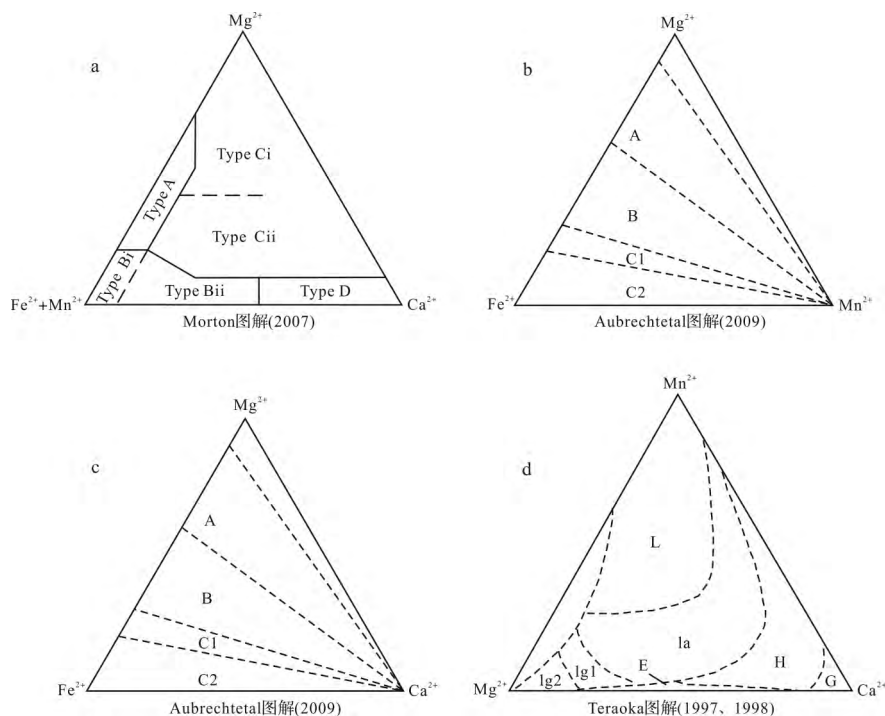


图 1 四种判别图解模型示意图

Fig.1 Four models for the discrimination diagram

生代花岗岩为主;祁连山的基底以元古界达背大板群不同级别变质岩为典型特征^[21-22]。Jian *et al.*^[3]在对柴达木盆地北部地区的第三系沉积物进行物源分析时,综合岩石学、重矿物分析和矿物化学数据,认为柴北缘和南祁连地体为其主要的沉积源区,并将研究区划分为三个沉积区(即A、B、C)(图2)。

大量的学者(包括上述图解的提出者)在进行物源分析时,均未考虑石榴石的粒径对于地球化学物源解释结果的影响,本文利用柴达木盆地北缘第三系16个样品的680个碎屑石榴石数据^[3],探讨不同粒径组成碎屑石榴石地球化学成分的变化规律,研究粒度(即沉积水动力分选作用)如何影响上述图解的物源解释结果。

1 地质背景及样品

柴达木盆地是位于青藏高原东北部的大型陆内沉积盆地(图2b)。盆地面积大约 $12 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地的海拔2700~3000 m,并保存了3~16 km 巨厚的中、新生代沉积物。柴达木盆地北缘(North Qaidam)以古生代变质带、浅海地层、糜棱岩、花岗岩为代表,含少量榴辉岩和石榴石橄榄岩^[3]。南祁连地体(South Qilian)以上元古界一下古生代变质岩为主^[20];阿尔金山南部地体由花岗岩、变质杂岩、奥陶系及侏罗系岩石组成;阿尔金山东部则以古生代和中

A区的沉积物具有较高的矿物成熟度,较高的石英、碎屑锆石、金红石、电气石矿物含量。并且具有较高的ZTR指数(碎屑岩中三种重矿物碎屑锆石、金红石、电气石在透明重矿物碎屑中所占的质量比)和较低的Ruzi指数(碎屑岩中碎屑金红石与碎屑金红石和碎屑锆石质量之和的比值)、Gzi指数(碎屑岩中碎屑石榴石与碎屑石榴石和碎屑锆石质量之和的比值)、Eti指数(绿帘石与绿帘石和电气石质量之和的比值)。A区的沉积物具有远源及多源的特征,母岩主要是不同等级的变质岩和中酸性火成岩;B区的沉积物具有较低的矿物成熟度以及较高的变质岩屑含量。较高的Ruzi、Gzi、Eti指数,较低的ZTR指数,反映了B区的沉积物的母岩类型相对单一。综合上述结果认为,B区沉积物主要的母岩类型为中低变质岩和高级变质岩;C区的沉积物具有较高的长石含量,中等的ZTR、Gti、Ruzi、Eti指数,C区沉积物可能具有多源的特征,由于分析样品较少,物源解释具有不确定性。

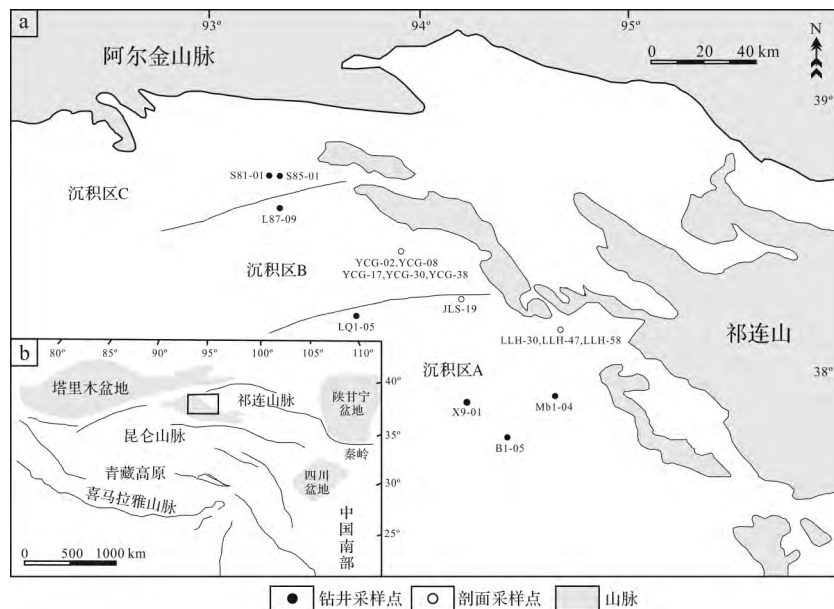


图2 柴达木盆地及研究区地质图

(a) 主要样品采样点分布以及沉积区划分; (b) 研究区位置图(自 Jian *et al.*^[3])

Fig.2 Geological setting of the Qaidam Basin and study area

(a) locations of the main investigated wells and depositional area; (b) location of the research area (modified from Jian *et al.*^[3])

2 分析方法

碎屑石榴石的主量元素电子探针分析由北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成,分析方法可见 Jian *et al.*^[3]。碎屑石榴石粒径数据的测量方法参考 Lawrence *et al.*^[23] 以及 Garzanti *et al.*^[24] 对于碎屑矿物的粒径测量方法。具体流程为:测量石榴石靶图上已分析的碎屑石榴石颗粒 X 轴(长轴)、Z 轴(短轴)长度,视 Y 轴长度与 Z 轴相等,并对三轴长度积开立方,即可得到该颗粒的等效球粒直径(ESD)。为了使研究结果更具普遍性,碎屑石榴石粒度范围分类参考 Wentworth^[25] 对于砂岩的经典粒度分类方法。即,将砂岩的粒径分为极细砂(0.063~0.125 mm);细砂(0.125~0.25 mm);中砂(0.25~0.5 mm);粗砂(0.5~1 mm);极粗砂(1~2 mm)。在有效的 663 个粒径数据中,有 229 个颗粒的粒径在 63~125 μm 之间,有 352 个颗粒的粒径在 125~250 μm 之间,有 82 个颗粒的粒径在 250~500 μm 之间。

3 结果与讨论

3.1 图解与解释

将总计 16 个样品的 663 个数据分别投入 Morton 图解(图 3a)、Aubrechtal 图解(图 3b,c)、Teraoka 图解(图 3d)(由于在该图解中区域较多,故根据各区域的温压条件将其分为低温压区(原 L 区和未定区),中温压区(La 区,lg1 区,lg2 区),高温压区(H 区,E 区,G 区)。统计各图中各区域样品颗粒数量并将结果归一化。再以各图解中的区域类型为端元,以各样品投入图解后落入各区域的颗粒数量百分比为端元值成图(图 4)。根据图 4 的结果我们可以发现,0.063~0.125 mm 粒径范围的碎屑石榴石具有比 0.125~0.25 mm 粒径范围的碎屑石榴石更加集中于某些端元的特征。以图 4 为依据,并综合四种图解和全部样品,得出物源解释结果(表 1)。根据该表可以给出,采用特定粒径范围的碎屑石榴石比采用全部粒度样品得到的物源解释结果更为准确的结论。此外,图 4a 的结果显示,0.063~0.125 mm 的碎屑石榴石比 0.125~0.25 mm 的碎屑石榴石更加集中在特定端元。即同一样品内,随着粒径范围的变小,该端元含量逐渐变大。换句话说,该端元(低级角闪岩相变沉积岩)产出的低 Mg 石榴石粒径主要分布在 0.063~0.125 mm 范围内。为了验证该结论,做以粒度- $\text{Fe}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{Mn}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 的二元图(图 5)。 $\text{Fe}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 和

$\text{Mn}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 是变质作用岩中常用的温压计。随着压力和温度的上升,变质岩中的 Mg^{2+} 含量增加, Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 减少,故随着变质等级的增加,二者的比值变小^[26-27]。根据图 5 可以得到,随着变质等级的升高,碎屑石榴石的粒度存在着逐渐变大小的特征。故 0.063~0.125 mm 的碎屑石榴石更可能为低级角闪岩相变质岩产出。

3.2 粒度对碎屑矿物地球化学物源分析结果的影响

Yang *et al.*^[5] 在对长江流域的碎屑锆石进行 U-Pb 定年研究时认为,由于较老的碎屑锆石在结晶之后受到了更多岩浆活动、构造活动和沉积再生活动的影 响,经历的风化过程和侵蚀过程较为严重,故存在着年龄较大的锆石粒度较小的特征;Malusà *et al.*^[6] 应用碎屑锆石进行热年代学研究时提到,由于富 U 和 Th 锆石的自我辐射和辐射损伤会使得矿物颗粒随着时间的推移变为无定形状态,这就会造成矿物的粒度与年龄产生一定程度的相关性;Sircombe *et al.*^[7] 在讨论碎屑锆石的粒径是否会对 U-Pb 定年产生影响时,根据粒度与碎屑锆石的年龄二元图判断二者是否存在关联的结论为否;Triebold *et al.*^[8] 在应用 Alps 的金红石进行物源分析时讨论了粒度与金红石的地球化学成分是否存在关系时,根据二者的相关性图解给出了 0.063~0.125 mm 与 0.125~0.25 mm 粒径范围的金红石地球化学成分没有系统性差别的结论。

在本研究中,利用柴达木盆地北部地区的 680 个碎屑石榴石样品进行物源解释时,应用特定范围粒径(0.063~0.125 mm)所得到的物源分析解释结果为低级变沉积岩,分析全部单矿物颗粒(680 个碎屑石榴石颗粒)得到的物源分析解释结果为中—低级变沉积岩、酸性岩浆岩、榴辉岩等原岩类型。并且发现,粒度较小(0.063~0.125 mm)的碎屑石榴石具有更可能由低级变沉积岩产出的特征。这个现象可以解释为:低级变沉积岩所产出的矿物变质结晶程度较弱,故粒度较小^[28]。而在高级变质岩中,矿物变质结晶程度较高,结晶程度较成熟,产出的石榴石颗粒也就较大。而该解释不仅可以被本次的实验数据所验证(图 4a,b,c 中分别有 68.75%、81.25%、81.25% 的样品颗粒符合上述结论,图 5),又可以被前人大量的数据验证^[29-33]。

因此,本文的研究结果表明:在一定程度或特定的研究区域内,粒度对单矿物地球化学物源分析的影响是不可忽略的,若仅仅随机分析一定数量的单矿物

颗粒,可能会得出较为宽泛的物源解释。而选取一定粒径范围内的碎屑矿物进行分析,则能够得出更加准确的物源解释结果。

4 结论

(1) 利用柴达木盆地北缘中碎屑石榴石的岩石

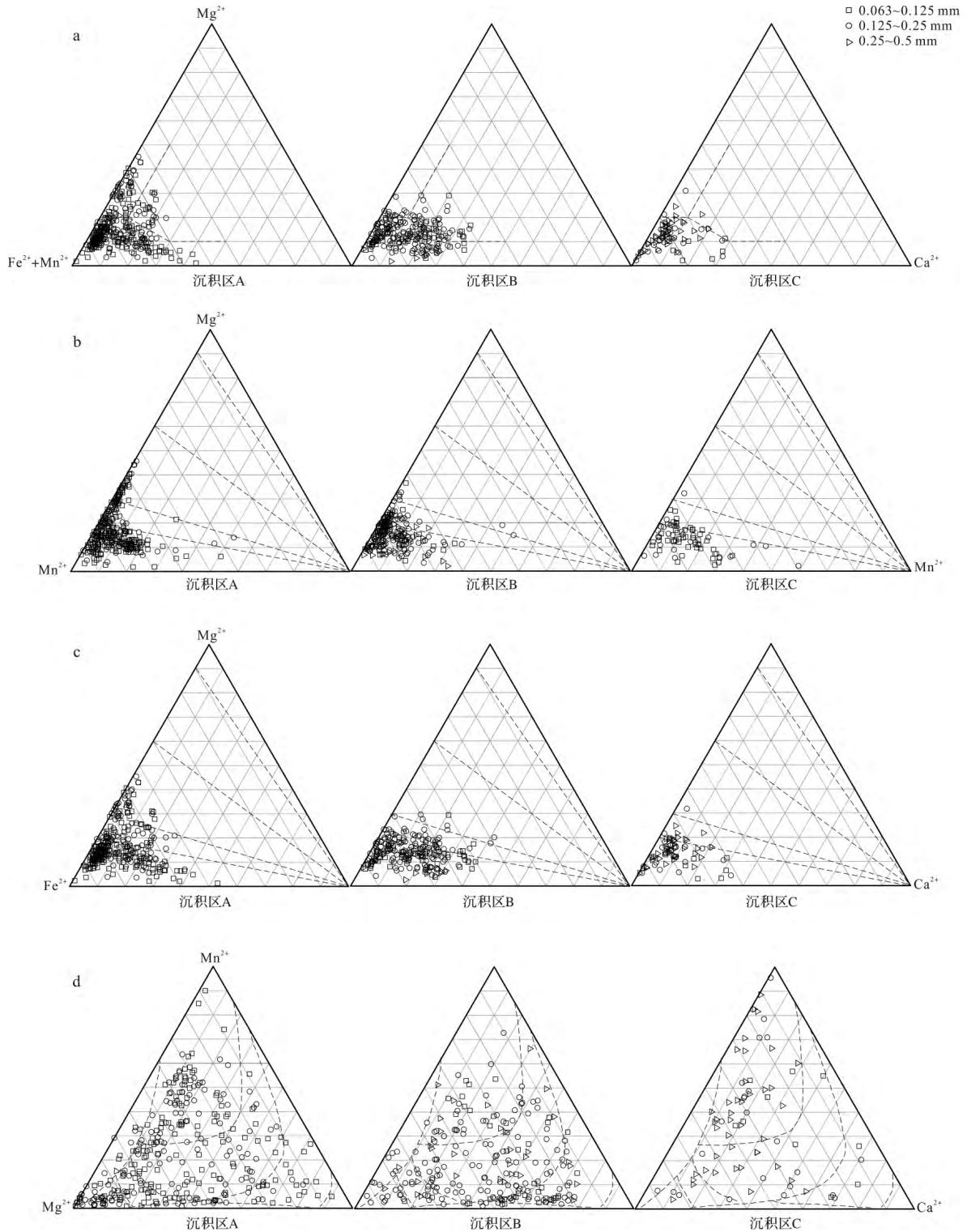


图3 各判别图解碎屑石榴石样品投点图

沉积区 A: B1-05, JLS-19, LQ1-05, X9-01, Mb1-04, LLH-30, LLH-47, LLH-58; 沉积区 B: L87-09, YCG-02, YCG-08, YCG-17, YCG-30, YCG-38; 沉积区 C: S81-01, S85-01

Fig.3 Discriminant graphical solutions for the clastic garnet sample projection

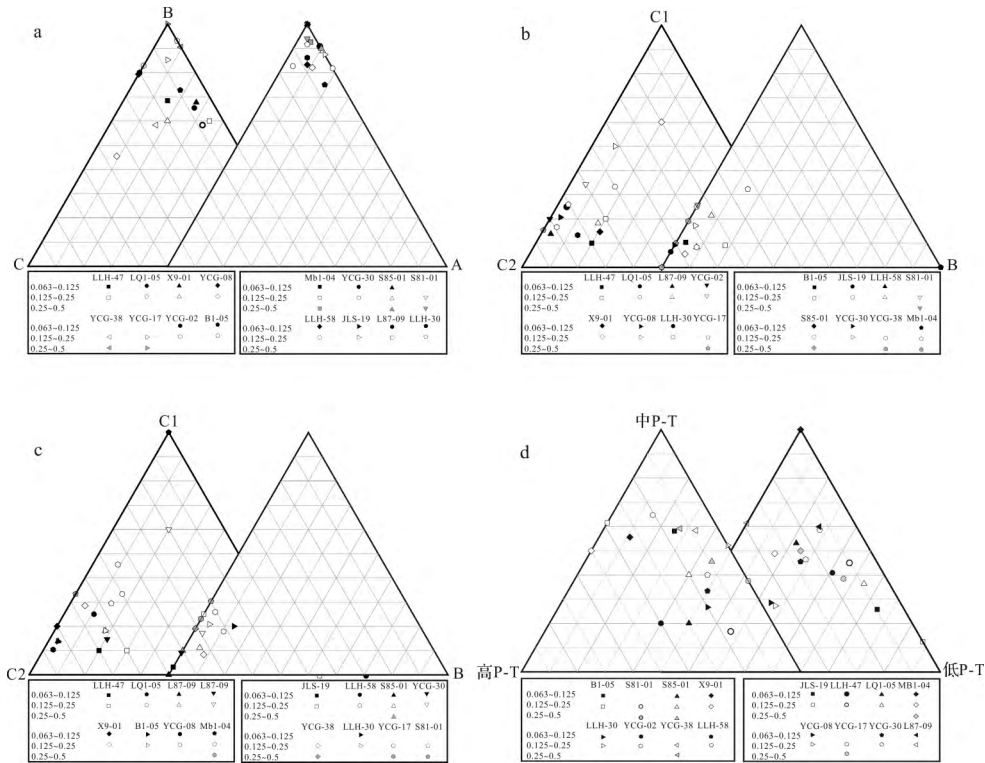


图 4 碎屑石榴石地球化学的数据再统计

注: 图 4a 中端元 A 为图 1a 中的区域 A, 端元 B, C 以及图 4b, 图 4c, 图 4d 同理; 图中各点端元值为各样品落入对应图解中各区域的颗粒数量百分比

Fig.4 Restatistical diagrams of geochemical data for elastic Garnet

表 1 各图解物源解释结果

Table 1 The provenance result of each diagram

图解	特定粒径物源解释结果	其他粒径颗粒物源解释结果	全部粒径物源解释结果	典型样品
Morton 图解	角闪岩相变质岩	角闪岩相变质岩, 中酸性火成岩	角闪岩相变质岩, 中酸性火成岩	LLH-47
Aubrechtal 图解 1	低级角闪岩相变质岩	角闪岩相变质沉积岩, 榴辉岩, 麻粒岩相	角闪岩相变质沉积岩, 榴辉岩, 麻粒岩相	YCG-08
Aubrechtal 图解 2	低级变沉积岩	角闪岩相变质沉积岩, 榴辉岩, 麻粒岩相	角闪岩相变质沉积岩, 榴辉岩, 麻粒岩相	YCG-08
Teraoka 图解	低级变质岩	低—中温压条件变质岩	低—中温压条件变质岩	L87-09

注: 特定粒径指 0.063~0.125 mm。Aubrechtal 图解 1 三元端为 $Mn^{2+}-Mg^{2+}-Fe^{2+}$, Aubrechtal 图解 2 三元端为 $Ca^{2+}-Mg^{2+}-Fe^{2+}$ 。

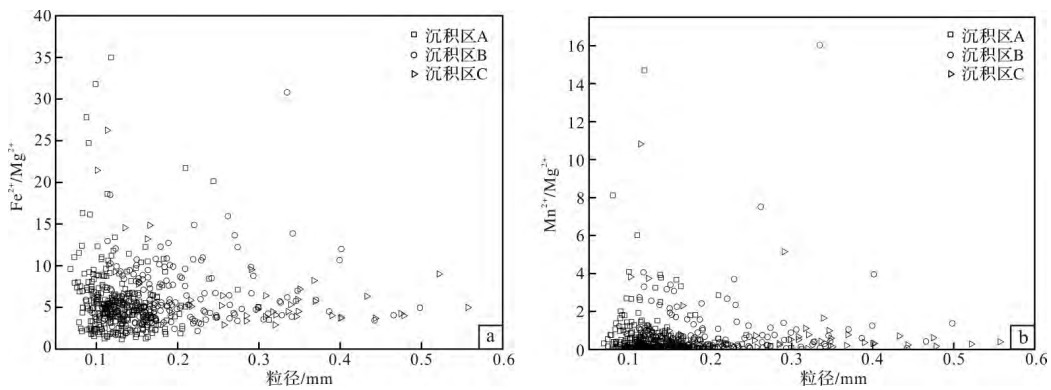


图 5 温压计—粒度二元关系图

Fig.5 Temperature-pressure Gauge-grain size diagram

学数据和地球化学数据对该沉积区的进行物源分析时,应用特定范围粒径(0.063~0.125 mm)所得到的物源分析解释结果为低级变沉积岩,分析全部单矿物颗粒(680个碎屑石榴石颗粒)得到的物源分析解释结果为中—低级变沉积岩、酸性岩浆岩、榴辉岩等原岩类型。这表明碎屑石榴石的颗粒大小在一定程度上会影响其地球化学物源解释结果。

(2) 在进行应用碎屑石榴石进行物源分析时,应注意到粒度可能会对物源分析结果产生影响,并在进行研究时,选取特定粒径组成的碎屑矿物进行分析,可以获得更为准确的物源解释结果。

参考文献 (References)

- [1] Gehrels G. Detrital zircon U-Pb geochronology: current methods and new opportunities [M]. *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances*, 2012: 45-62.
- [2] 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(3): 393-410.
- [3] Jian X, Guan P, Zhang D W, et al. Provenance of Tertiary sandstone in the northern Qaidam basin, northeastern Tibetan Plateau: integration of framework petrography, heavy mineral analysis and mineral chemistry [J]. *Sedimentary Geology*, 2013, 290: 109-125.
- [4] 简星, 关平, 张巍. 碎屑金红石: 沉积物源的一种指针 [J]. *地球科学进展* 2012, 27(8): 828-846. [Jian Xing, Guan Ping, Zhang Wei. Detrital rutile: A sediment provenance indicator [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(8): 828-846.]
- [5] Yang S Y, Zhang F, Wang Z B. Grain size distribution and age population of detrital zircons from the Changjiang (Yangtze) River system, China [J]. *Chemical Geology*, 2012, 296-297: 26-38.
- [6] Malusà M G, Carter A, Limoncelli M, et al. Bias in detrital zircon geochronology and thermochronometry [J]. *Chemical Geology*, 2013, 359: 90-107.
- [7] Sircombe K N, Stern R A. An investigation of artificial biasing in detrital zircon U-Pb geochronology due to magnetic separation in sample preparation [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(13): 2379-2397.
- [8] Triebold S, von Eynatten H, Zack T. A recipe for the use of rutile in sedimentary provenance analysis [J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 282: 268-275.
- [9] Morton A C, Hallsworth C R. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones [J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 124(1/2/3/4): 3-29.
- [10] 简星. 柴达木盆地北部中—新生代沉积演化及其构造、气候意义 [D]. 北京: 北京大学, 2013. [Jian Xing. Meso-Cenozoic sedimentary evolution and tectonic and climatic significance in northern Qaidam Basin [D]. Beijing: Beijing University, 2013.]
- [11] Wright W I. The composition and occurrence of garnets [J]. *American Mineralogist*, 1938, 23: 436-449.
- [12] Grew E S, Locock A J, Mills S J, et al. Nomenclature of the garnet supergroup [J]. *American Mineralogist*, 2013, 98(4): 785-811.
- [13] 赵珊茸. 结晶学及矿物学 [M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2011: 353-356. [Zhao Shanrong, *Crystallography and mineralogy* [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2011: 353-356.]
- [14] 李任伟, 李忠, 江茂生, 等. 合肥盆地碎屑石榴石组成及其对源区恢复和地层对比的意义 [J]. *中国科学 (D 辑): 地球科学*, 2000, 30(增刊1): 91-98. [Li Renwei, Li Zhong, Jiang Maosheng, et al. Compositions of Jurassic detrital garnets in Hefei Basin and its implication to provenance reconstruction and stratigraphic correlation [J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 2000, 30(Suppl.1): 91-98.]
- [15] 卜香萍, 石永红, 李忠. 鲁西隆起区晚中生代地层碎屑石榴石分析及物源区构造演化示踪 [J]. *沉积学报* 2012, 30(6): 999-1009. [Bu Xiangping, Shi Yonghong, Li Zhong. Fragment garnet analysis and tectonic evolution of its provenance in Late Mesozoic strata in the Luxi Uplift [J]. *Journal of Deposition*, 2012, 30(6): 999-1009.]
- [16] Aubrecht R, Méres Š, Sýkora M, et al. Provenance of the detrital garnets and spinels from the Albian sediments of the Czorsztyn Unit (Pieniny Klippen Belt, Western Carpathians, Slovakia) [J]. *Geologica Carpathica*, 2009, 60(6): 463-483.
- [17] Mange M A, Morton A C. Geochemistry of heavy minerals [J]. *Developments in Sedimentology*, 2007, 58: 345-391.
- [18] Teraoka Y, Suzuki M, Hayashi T, et al. Detrital garnets from Paleozoic and Mesozoic sandstones in the Onogawa area, East Kyushu, Southwest Japan [J]. *Bulletin of the Faculty of School Education, Hiroshima University*, 1997, 19: 87-101.
- [19] Teraoka Y, Suzuki M, Kawakami K. Provenance of cretaceous and Paleogene sediments in the median zone of Southwest Japan [J]. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 1998, 49: 395-411.
- [20] Gehrels G E, Yin A, Wang X F. Magmatic history of the northeastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(B9): 2423.
- [21] 张新虎, 芮国朝, 田培昭, 等. 祁连山、北山地区古板块及地体构造的划分 [J]. *西北地质*, 1993, 14(2): 1-5. [Zhang Xinhu, Gou Guochao, Tian Peizhao, et al. The division of ancient plate and ground structure in Qilian Mountain and North Mt. area [J]. *Northwestern Geology*, 1993, 14(2): 1-5.]
- [22] 卢良兆, 叶慧文, 迟洪兴. 祁连山活动带的变质作用类型及地质演化 [J]. *长春地质学院学报*, 1984(2): 21-30, 20. [Lu liangzhao, Ye Huiwen, Chi Hongxing. On the patterns of metamorphism and geological evolution in the Qi-Lian mobile belt [J]. *Journal of Changchun College of Geology*, 1984(2): 21-30, 20.]
- [23] Lawrence R L, Cox R W, Mapes R W, et al. Hydrodynamic fractionation of zircon age populations [J]. *GSA Bulletin*, 2011, 123(1/2): 295-305.
- [24] Garzanti E, Andò E, Vezzoli G. Settling equivalence of detrital minerals and grain-size dependence of sediment composition [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 273(1/2): 138-151.

- [25] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments [J]. *Journal of Geology*, 1922, 30(5) : 377-392.
- [26] Perchuk L L. The effect of temperature and pressure on the equilibrium of natural iron-magnesium minerals [J]. *International Geology Review*, 1969, 11(8) : 875-901.
- [27] 崔文元, 陈亚平. 集宁-张家口地区变质岩中石榴石和黑云母的化学成分及其结晶条件 [J]. *矿物岩石*, 1987, 7(3) : 39-50. [Cui Wenyuan, Chen Yaping. Chemical composition of garnets and biotites in metamorphic rocks and the conditions of the crystallization from Jining-Zhangjiakou area [J]. *Minerals and Rocks*, 1987, 7(3) : 39-50.]
- [28] 吴泰然, 何国琦. 普通地质学 [M]. 2 版. 北京: 北京大学出版社, 2011: 254-256. [Wu Tairan, He Guoqi. *General geology* [M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 2011: 254-256.]
- [29] 董永胜, 张修政, 施建荣, 等. 藏北羌塘中部高压变质带中石榴子石白云母片岩的岩石学和变质特征 [J]. *地质通报*, 2009, 28(9) : 1201-1206. [Dong Yongsheng, Zhang Xiuzheng, Shi Jianrong, et al. Petrology and metamorphism of garnet-muscovite schist from high pressure metamorphic belt in central Qiangtang, northern Tibet, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(9) : 1201-1206.]
- [30] 陈博, 朱永峰, 魏少妮, 等. 西准噶尔克拉玛依蛇绿混杂岩中的石榴角闪岩 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(5) : 1034-1040. [Chen Bo, Zhu Yongfeng, Wei Shaoni, et al. Garnet amphibolite found in Keramay ophiolitic mélange, western Junggar, NW China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(5) : 1034-1040.]
- [31] Padró-Navarta J A, Garrido C J, Sánchez-Navas A, et al. Oriented growth of garnet by topotactic reactions and epitaxy in high-pressure, mafic garnet granulite formed by dehydration melting of metastable hornblende-gabbro-norite (Jijal Complex, Kohistan Complex, north Pakistan) [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2008, 26(8) : 855-870.
- [32] Anczkiewicz R, Szczepański J, Mazur S, et al. Lu - Hf geochronology and trace element distribution in garnet: implications for uplift and exhumation of ultra-high pressure granulites in the Sudetes, SW Poland [J]. *Lithos*, 2007, 95(3/4) : 363-380.
- [33] Faryad S W, Nahodilová R, Dolejš D. Incipient eclogite facies metamorphism in the Moldanubian granulites revealed by mineral inclusions in garnet [J]. *Lithos*, 2010, 114(1/2) : 54-69.

Detrital Garnet Geochemistry-based Provenance Analysis and Interpretation: The effect of grain size

HUANG Xin¹, JIAN Xing¹, ZHANG Wei¹, HONG DongMing¹, GUAN Ping², DU JinXue³, ZHANG PengFei⁴

1. State Key Laboratory of Marine Environmental Science (Xiamen University), College of Ocean and Earth Science, Xiamen, Fujian 361102, China
2. Ministry of Education Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China
3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
4. Pingbei Petroleum Cooperation Development Project Department of Changqing Oilfield Company, Yan'an, Shaanxi 717408, China

Abstract: Single mineral geochemistry is an important approach for sedimentary provenance analysis and is widely used. Whether grain size compositions of clastic minerals (i. e. , hydrodynamic sorting process) affect sedimentary provenance interpretation is not yet clear, and not enough attention has been given to this issue. In this paper, 680 detrital garnets (0.068-0.557 mm) from the Tertiary sedimentary rocks in the northern Qaidam basin were studied, and the provenance of the detrital garnets with different grain sizes was interpreted based on major element geochemical data. Fe²⁺ and Mn²⁺ contents are higher when the grain size of the garnet is between 0.063 mm and 0.125 mm, so the result of sedimentary provenance interpretation is more likely to be from the metamorphism of lower-level amphibolite facies. In the other grains, Ca²⁺ and Mg²⁺ contents are higher, and the resulting explanation of provenance is the broad result of low-grade metamorphic facies, intermediate-acidic igneous rocks and eclogite, etc. Different geochemical compositions caused by the difference of grain size of the clastic garnet show the grain size of the detrital garnets, which will affect the geochemistry-based provenance interpretation. Therefore, in the case of single mineral geochemistry-based provenance analysis, concentrating on detrital minerals with certain grain size compositions (0.063-0.125 mm or 0.125-0.25 mm) can eliminate the influence of the hydrodynamic sorting process and help obtain more accurate provenance interpretation results.

Key words: garnet; geochemistry; provenance analysis; grain size