

张硕,简星,张巍.碎屑磷灰石对沉积物源判别的指示[J].地球科学进展,2018,33(11):142-153.DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2018.11.1142.[Zhang Shuo, Jian Xing, Zhang Wei. Sedimentary provenance analysis using detrital apatite: A review[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(11):142-153.DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2018.11.1142.]

碎屑磷灰石对沉积物源判别的指示*

张 硕,简 星*,张 巍

(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)

摘 要:基于单颗粒碎屑磷灰石原位分析的物源分析是沉积地质学研究的一种重要手段。磷灰石中 Sr、Y 和稀土等微量元素含量由 SiO₂ 含量和所在熔体中的分配系数控制,微量元素的含量在不同岩石的磷灰石中差异较大,可作为指示其母岩类型的重要指标。磷灰石在物源分析中的应用可归纳为以下 3 个方面:①元素地球化学,特征元素包括 Sr、Y、稀土元素(REE)等;②同位素地球化学,包括 Sr-Nd 同位素、Lu-Hf 同位素等;③单颗粒多法定年,即同颗粒磷灰石进行(U-Th)/He、裂变径迹和 U-Pb 定年分析。综合上述 3 个方面可获得磷灰石的母岩类型、形成条件和后期演化、源区抬升剥蚀史、沉积区沉降史等信息。尽管碎屑磷灰石的热年代学目前在沉积物源研究中运用广泛,但基于碎屑磷灰石元素及同位素地球化学(包括磷灰石 U-Pb 同位素定年)的沉积物源判别仍处于起步阶段,在沉积地质学、盆地分析、构造地质学等研究领域具有广阔的应用前景。

关 键 词:磷灰石;物源分析;元素地球化学;同位素地球化学;多法定年

中图分类号:P597.3

文献标志码:A

文章编号:1001-8166(2018)11-1142-12

1 引 言

沉积物源分析的内容主要包括源区母岩类型及岩石组合判别、构造背景重建、古地理及古气候恢复以及沉积区沉积体系再现等方面^[1]。传统的分析方法包括重矿物方法、黏土矿物学方法、岩石学方法和全岩元素地球化学方法等^[2],但是这些常规的分析方法得到的往往是物源供给平均效应的结果,并不适用于沉积源区多元化的沉积条件^[3]。随着技术条件的不断提高,特别是激光剥蚀等离子质谱技术(LA-ICP-MS)在固体地球化学领域的广泛运用,碎屑单矿物的元素地球化学、同位素、热年代学的研究为克服上述方法的缺陷提供了可能,同时也使得沉积学研究朝着定量的方向发展,已成为沉积学研究的

热点。碎屑锆石因其高稳定性在沉积物源研究中运用最为广泛^[4],碎屑磷灰石的热年代学也是沉积物源分析研究中常见的手段^[5],但对其元素、同位素地球化学示踪方法的关注不多。

磷灰石作为碎屑沉积岩中常见的重矿物,可来源于三大类岩石,在花岗岩、花岗伟晶岩、榴辉岩、磷块岩等岩石中较为常见。磷灰石(Ca₅[PO₄]₃(OH,F,Cl))富集 Sr、Y 和稀土元素(Rare Earth Element, REE)等不相容元素,而且微量元素的含量受 SiO₂ 含量和所在熔体中的分配系数所控制,因此微量元素的含量在不同岩石的磷灰石中差异较大,可作为指示其母岩类型的重要指标^[6]。此外,磷灰石的热年代学——(U-Th)/He 定年体系(AHe)和裂变径迹定年体系(Apatite Fission

* 收稿日期:2018-06-15;修回日期:2018-10-12.

* 基金项目:国家自然科学基金项目“闽江不同季节入海悬浮沉积物的物源分析:来自微量元素和 Sr-Nd 同位素的约束”(编号:41806052);福建省自然科学基金项目“闽江口沉积物的 Nd 同位素组成与物源示踪”(编号:2017J05067)资助。

作者简介:张硕(1995-),男,陕西汉中,人,硕士研究生,主要从事沉积地质学及沉积地球化学研究。**E-mail:**zhangshuomarine@163.com

* 通信作者:简星(1987-),男,江西上高,人,副教授,主要从事沉积地质学及沉积地球化学研究。**E-mail:**xjian@xmu.edu.cn

Track, AFT)能够反映磷灰石冷却的低温热历史信息^[7],磷灰石的 U-Pb 年龄可以反映晶体的高温热历史信息^[8],将二者结合能够提供磷灰石更完整的热历史信息^[9]。值得注意的是,与锆石相比,磷灰石具有相对弱稳定性,即在酸性地表水条件下较易风化^[10],可作为初次沉积旋回的代表矿物,能够直接反映源区信息^[11]。近年来已有利用碎屑磷灰石的地球化学和热年代学进行物源分析的报道,如 Malusà 等^[12]对意大利波河物源分析的研究中,系统地碎屑磷灰石进行了元素地球化学、Sm-Nd 同位素和热年代学研究。但稳定克拉通背景下的沉积物可能会经历多次沉积旋回,不稳定组分易丢失,使用碎屑磷灰石进行沉积物源示踪可能产生错误的结果。本文主要介绍来自不同类型岩石的磷灰石地球化学特征,结合国内外的最新研究进展,对碎屑磷灰石在物源分析中的应用进行总结。

2 磷灰石矿物学特征

磷灰石属磷酸盐矿物,是重要的含磷矿物,六方晶系,链状结构;空间群 $C_{6h}^2-R_6$ 3/m,晶胞参数 $a_0=0.943\sim 0.938$ nm, $c_0=0.688\sim 0.686$ nm,单胞分子数 $Z=2$ ^[13]。无色,含杂质常为浅绿色、黄绿色、褐色,含有机质呈灰黑色,白色条痕,玻璃光泽,摩氏硬度 5, {0001} 不完全解理,断口不平坦,相对密度 3.18~3.21^[14]。晶形与产出环境有关:外生成因的磷灰石多为轴面纤维状;内生成因的磷灰石晶形与温度相关:从高温到低温,其形态总体上有长柱状—短柱状—板状的转化趋势^[15]。一轴晶,纵断面柱状,横断面六边形,单偏光下无色正交偏光下 I 级灰,折射率 $N_o=1.629\sim 1.667$, $N_e=1.624\sim 1.666$,正中凸起,平行消光^[16]。

3 磷灰石矿物化学

磷灰石化学式为 $Ca_5[PO_4]_3(OH, F, Cl)$, Ca^{2+} 可被 Ce^{3+} , Sr^{2+} , Na^+ , Y, Mn, Th 和 REE 等类质同象替换^[6,17], $[PO_4]_3^{3-}$ 常被 CO_3^{2-} , SiO_4^{4-} , SO_4^{2-} 类质同象替换,按附加阴离子分为氟磷灰石 $Ca_5[PO_4]_3F$ 、氯磷灰石 $Ca_5[PO_4]_3Cl$ 和羟基磷灰石 $Ca_5[PO_4]_3OH$ 3 个亚种,其中氟磷灰石自由能最小而最为常见,因此一般所指的磷灰石为氟磷灰石^[18]。此外,还有碳磷灰石 $Ca_5[PO_4, CO_3(OH)]_3$ 、锰磷灰石 $(Ca, Mn)_5[PO_4]_3(F, OH)$ 等。火成岩中,磷灰石 F 含量随岩石分异程度的增加而增加,Cl 与之相反,在低分异度岩石中含量更丰富^[6,19]。

磷灰石微量元素组成常用 LA-ICP-MS 测定。

岩浆岩中的磷灰石大部分元素没有成分分带,但是 Th 和 U 等元素存在分带,在外围存在一个约 20 μm 厚的包壳,其 U 和 Th 含量与磷灰石中 U 和 Th 整体含量存在明显差异^[20-23],因而会影响 U-Pb 定年和 (U-Th)/He 定年。为避免 U 和 Pb 成分分带带来的误差,Spiegel 等^[24]提出将磷灰石最外围的 20 μm 磨蚀掉之后再进行测试。高压—超高压变质带中的磷灰石存在明显的成分分带,以 REE 为例,新疆西南天山榴辉岩中的磷灰石除 Lu 之外,其余 REE 的含量从边部到核部升高数倍至 2 个数量级^[25],大别—苏鲁榴辉岩的磷灰石中从边部到核部轻稀土元素 (Light Rare Earth Element, LREE) 含量上升 3~5 倍,重稀土元素 (Heavy Rare Earth Element, HREE) 含量下降 2~4 倍^[26]。因此在进行 LA-ICP-MS 分析时必须要考虑成分分带带来的影响,在对碎屑磷灰石进行测试时,尽可能选取相同或相似位置的测试点位。

磷灰石富集 S 和 Y 等不相容元素,且微量元素含量的变化与全岩 SiO_2 含量有关,表明母岩的分异程度为磷灰石化学组成的主要控制因素,例如分异过程中 Y, Mn 和 HREE 在逐渐富集,而 Sr 含量逐渐降低^[27],因此通过元素含量特征或二元图解来判断母岩类型是完全可行的。磷灰石 U 和 Th 含量较低,而且 Th 含量在高分异度岩石的磷灰石中含量更低,原因是独居石在结晶过程中会吸收 Th 和 LREE。U 与之相反,在花岗岩和花岗伟晶岩中含量为 $20\times 10^{-6}\sim 25\times 10^{-6}$,在辉绿岩中为 $2.3\times 10^{-6}\sim 4.2\times 10^{-6}$ ^[6,28]。

REE 在磷灰石中较为富集, Σ REE 含量取决于母岩中的 REE 组成,其中碳酸岩中的磷灰石 REE 含量最高,可达数个百分点^[28],最小值出现于花岗伟晶岩和辉绿岩^[6]。磷灰石 REE 球粒陨石标准化配分模式则取决于母岩性质特别是分异程度^[15,29]。

磷灰石中常见流体包裹体以及锆石、独居石、榍石等矿物包裹体,挑选样品时尽量避免选取有包裹体的磷灰石,在进行测试时,测试点位必须避开包裹体。

4 不同岩石中的磷灰石特征

磷灰石广泛存在于三大岩类中,下面从 3 个方面论述各类型岩石中的磷灰石矿物学和矿物化学特征。

4.1 岩浆岩及铁矿床

Hoche 等^[30]认为岩浆岩中磷灰石的晶习和形态与其形成条件有关,等径粒状磷灰石多形成于近平衡条件,岩浆结晶晚期磷灰石可形成于矿物之间,自形程度较差;针状磷灰石形成于快速冷凝或远离

平衡条件的环境。磷灰石在碱性岩中紧密堆积,常与霞石和长石共生。磷灰石在基性岩中与磁铁矿或钛铁矿共生,有时出现于斑晶中。花岗岩中的磷灰石多为细针状出现于造岩矿物间隙中^[31]。铁矿床中的磷灰石晶体颗粒较大,如内蒙古黑鹰山铁矿中磷灰石粒径从数毫米到数厘米,最大者为 14 cm×2 cm^[32];江苏宁芜陶村铁矿中磷灰石粒径为 0.5~2 mm,少量达 5 mm^[33];河南舞阳赵案庄铁矿中磷灰石粒径为 0.3~1.5 mm^[34]。

矿物化学上,大部分岩浆岩中的磷灰石为氟磷灰石,橄榄岩捕掳体中可见桃红色的羟基磷灰石^[6]。微量元素能够通过类质同象替换进入到磷灰石中,因此不同岩浆岩中磷灰石的微量元素差异明显,可作为判别磷灰石来源的重要依据^[29]。

磷灰石中 Σ REE 含量取决于母岩中的 REE 组成,其中碳酸岩中的磷灰石 REE 含量最高,可达数个百分点,最小值出现于花岗伟晶岩和辉绿岩^[6,28]。此外,各岩石中磷灰石的 REE 球粒陨石标准化配分模式也有较大差别(图 1),球粒陨石数据来自参考文献^[44]。

4.2 变质岩

磷灰石是高压—超高压变质带中常见的矿物,在退变质过程中仍能够稳定存在。目前对变质岩磷灰石的研究主要集中于榴辉岩。

榴辉岩中的磷灰石最显著的辨别特征是晶体中的出溶结构。近年来所报道的磷灰石出溶结构包括磁铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿、独居石、锶重晶石等,其宽度在 1~10 μm ,长度几微米到几十微米,多呈柱状或棒状,长宽比大于 10:1^[45~47]。

榴辉岩中磷灰石以高 Cu 和 Ti 为特征。REE 特别是 LREE 含量很高, Σ REE 的范围很大,南天山超高压变质带中为 $12\times 10^{-6}\sim 657\times 10^{-6}$,苏鲁榴辉岩中为 $296\times 10^{-6}\sim 6\ 965\times 10^{-6}$ ^[24,41],REE 球粒陨石标准化配分模式图解如图 1k 所示。榴辉岩中磷灰石的 REE 配分模式与母岩的退变质程度有关,退变质程度越高, Σ REE 特别是 LREE 含量越低。

4.3 沉积岩

磷灰石在沉积岩中主要产出于碎屑沉积岩和磷块岩,但由于弱稳定性,碎屑沉积岩中的磷灰石无法再经历剥蚀搬运作用进入沉积物中,因此本文只讨论磷块岩中的磷灰石特征。

磷块岩中的磷灰石粒径为 0.01~1 mm,多呈柱状或粒状,可见半月形、S 形、弯钩形等弯曲变形形态,常与石英伴生^[48]。其 REE 球粒陨石标准化配

分模式如图 1l 所示,沉积磷块岩中的磷灰石 REE 配分模式图较为平直,REE 分馏不明显,Eu 具有中等负异常,部分磷灰石具有弱—中等 Ce 负异常。

5 碎屑磷灰石物源示踪方法

沉积岩中碎屑磷灰石的微量元素地球化学、多法定年、Sr-Nd 同位素、Lu-Hf 同位素等方法可以广泛地运用于沉积物源分析研究中,下面对这些方法进行简要介绍。

5.1 磷灰石微量元素地球化学

前文已述及磷灰石中微量元素含量范围很大,且不同来源的磷灰石微量元素差异较大,因此可根据微量元素含量及元素之间的比值对磷灰石母岩进行判别。Belousova 等^[6]利用分类回归树(Classification and Regression Tree, CART)对磷灰石母岩进行判别。本文依据前人部分数据对其中一张 CART 进行改进(图 2)。图 2 以微量元素含量或比值作为依据,对磷灰石母岩进行逐步分类,直至确定其母岩类型,该图有 2 个优点:①准确度高,准确率除花岗伟晶岩为 79%之外,其余岩石类型均在 95%以上;②所用元素种类少,易于建立较大数据库进行对比。

由于稀土元素对成岩环境的反应极为敏感,来源不同的磷灰石稀土配分模式差异较为明显,详见图 1,因此可以用稀土配分模式来反映母岩类型。

Belousova 等^[6]根据磷灰石的稀土特征参数及微量元素含量,分别绘制了 Sr-Y 图解、Y-Eu/Eu* 图解、Mn-Sr 图解、(Ce/Yb)_N- Σ REE 图解,上述图解的组合使用能够对大部分的磷灰石母岩类型进行有效判别,但是该图解存在一定缺陷:①该图解中只包含了部分岩浆岩,并未涉及到沉积岩及变质岩;②部分岩石如花岗岩和花岗伟晶岩在 4 个图解中均具有较大的重合区域因而无法对其进行辨别。

本文参照上述图解,分别作出 (Gd/Yb)_N- δ Eu 图解、(La/Sm)_N-(La/Yb)_N 图解、(La/Yb)_N- Σ REE 图解(图 3)。

通过上述图解可对绝大部分的磷灰石母岩类型进行判别,但个别类型岩石来源的磷灰石无法完全辨别,如正长岩和橄榄岩在 3 个二元图解中均具有较大面积的重合,辉绿岩区域在 3 个图解中完全被岩型铁矿覆盖,其原因可能有 2 种:①部分类型岩石来源的磷灰石数据量较小;②母岩中磷灰石的形成、演化的条件差异较小。因此,如果在物源判别中磷灰石落到上述重合区域内,应当再使用其他方法对母岩进行辨别。

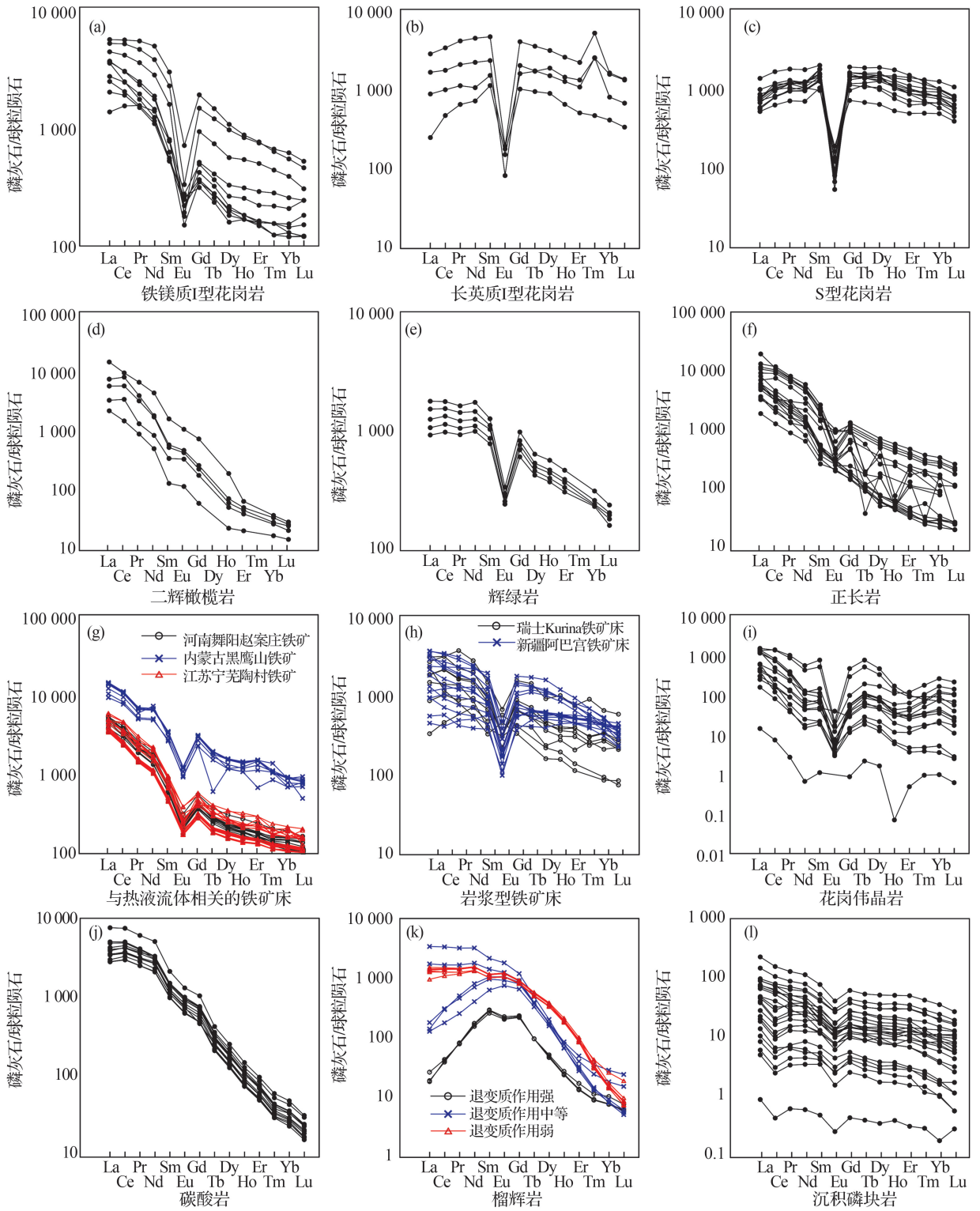


图 1 各类岩石中磷灰石 REE 球粒陨石标准化配分模式图

Fig.1 Chondrite-normalised REE distribution patterns of apatites from different rock types

(a)~(c) 数据来自参考文献[19];(d),(e) 数据来自参考文献[6];(f) 数据来自参考文献[35,36];(g) 数据来自参考文献[32~34];(h) 数据来自参考文献[37,38];(i) 数据来自参考文献[39];(j) 数据来自参考文献[40];(k) 数据来自参考文献[41];(l) 数据来自参考文献[42,43]
 The data in (a)~(c) comes from reference[19]; The data in (d),(e) comes from reference[6]; The data in (f) comes from references[35,36];
 The data in (g) comes from references[32~34]; The data in (h) comes from references[37,38]; The data in (i) comes from reference[39];
 The data in (j) comes from reference[40]; The data in (k) comes from reference[41]; The data in (l) comes from references[42,43]

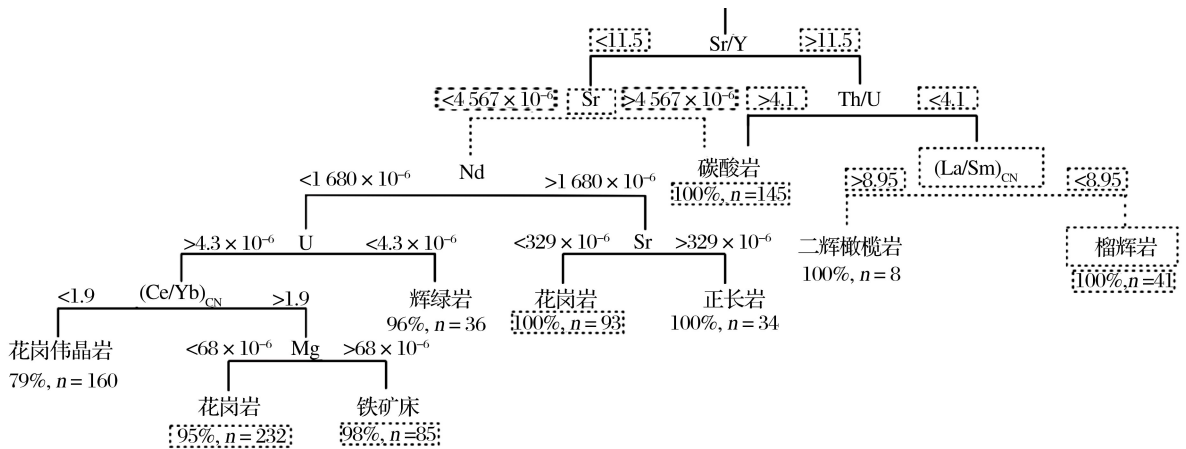


图 2 辨别磷灰石母岩类型的分类回归树

Fig.2 CART for the recognition of apatites from different rock types

虚线部分为本文改动或增加部分,增加部分数据来源:榴辉岩数据来自参考文献[25,41];碳酸岩数据来自参考文献[40,49];

花岗岩数据来自参考文献[19,50];铁矿床数据来自参考文献[33,37]

The dotted lines mean the modified or added, the data in added part; The data in eclogite comes from references [25,41]; The data in carbonatite comes from references [40,49]; The data in granite comes from references [19,50]; The data in iron deposit comes from references [33,37]

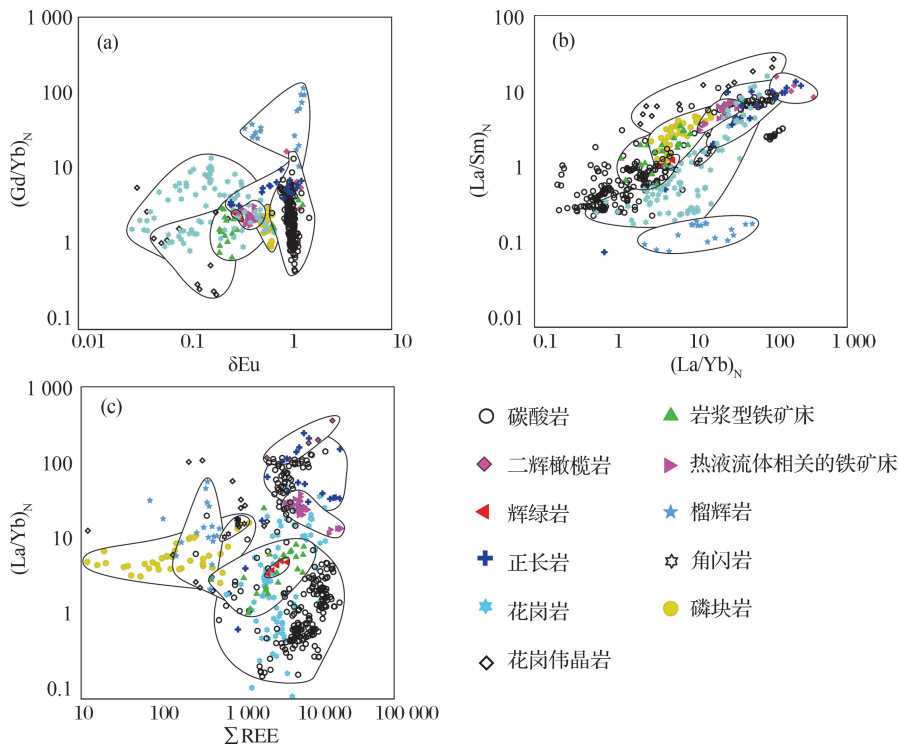


图 3 不同岩石类型的二元判别图解

Fig.3 Fields of apatite composition from different rock types, proposed as discriminant plots

(a) $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ - δEu 图解; (b) $(\text{La}/\text{Sm})_N$ - $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 图解; (c) $(\text{La}/\text{Yb})_N$ - $\sum\text{REE}$ 图解; 碳酸岩数据来自参考文献 [40,49]; 二辉橄榄岩、辉绿岩数据来自参考文献 [6]; 正长岩数据来自参考文献 [35,36]; 花岗岩数据来自参考文献 [19,50~52]; 花岗岩伟晶岩数据来自参考文献 [39]; 岩浆型铁矿床数据来自参考文献 [37,38]; 热液流体相关的铁矿床数据来自参考文献 [32~34]; 榴辉岩数据来自参考文献 [41]; 角闪岩数据来自参考文献 [53]; 磷块岩数据来自参考文献 [42,43]

(a) Plot of $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ - δEu , (b) Plot of $(\text{La}/\text{Sm})_N$ - $(\text{La}/\text{Yb})_N$, (c) Plot of $(\text{La}/\text{Yb})_N$ - $\sum\text{REE}$. The data in carbonatite comes from references [40,49]; The data in Iherzolite and dolerite comes from reference [6]; The data in syenite comes from references [35,36]; The data in carbonatite comes from references [19,50~52]; The data in granitic pegmatite comes from reference [39]; The data in magmatic iron deposit comes from references [37,38]; The data in hydrothermal iron deposit comes from references [32~34]; The data in eclogite comes from reference [41]; The data in amphibolite comes from reference [53]; The data in phosphorite comes from references [42,43]

目前已有利用磷灰石的元素地球化学特征判别沉积物来源的报道, Morton 等^[54] 对南里海盆地古库纳河和古伏尔加河的物源分析中, 利用 LA-ICP-MS 测定碎屑磷灰石中的元素含量, 发现古伏尔加河沉积层的碎屑磷灰石母岩类型中花岗岩类占到了 42%~63%, 辉绿岩占到了 19%~20%; 古库纳河沉积层中高分异度岩石较少, 花岗岩类贡献率为 10%~32%, 辉绿岩占 11%~19%, 铁矿石占 19%~20%, 个别组中二辉橄榄岩占 26%; Malusà 等^[12] 测定了意大利波河流域中碎屑磷灰石的微量元素含量, 发现与 External 地块相比, 来源于阿尔卑斯山中部 Lepontine 穹隆的碎屑磷灰石 HREE 富集而 Ce 和 U 丰度值较低。

5.2 磷灰石多法定年

多法定年是指对同一单矿物颗粒进行多种手段定年获得不同的年代学年龄, 从而获得源区和沉积区的热历史^[55], 目前磷灰石多法定年常用的手段为三法定年和单颗粒双法定年。若将磷灰石多法定年和其他定年方法结合, 源区结晶—抬升冷却信息和沉积区的沉降—抬升历史信息将更加完整(图 4a)。Carrapa 等^[55] 在对 Andean Puna 中央高原始新世沉积物的研究中首次使用了磷灰石三法定年。本文将分别对磷灰石的低温热年代学、U-Pb 定年和多法定年在物源分析中的应用进行介绍。

5.2.1 磷灰石低温热年代学

磷灰石是低温热年代学研究中应用最广泛的矿

物之一^[57], 能够记录岩石在抬升过程最后阶段的低温热历史, 对其他同位素定年系统形成补充, 提供更加完整的热历史数据。目前磷灰石热年代学最常用的手段是 (U/Th)-He 定年和裂变径迹定年。

AHe 体系封闭温度是已知定年体系中最低的, 仅为 70 °C 左右^[58,59], 因此可反映地质作用冷却过程最后阶段的信息^[60,61]。但是 AHe 定年过程复杂、周期长、成本高、精度低等局限性进一步制约了该方法的发展^[62]。付山岭等^[63] 报道了原位 (U-Th)/He 同位素定年技术, 为解决上述问题提供了可靠选择, 或成为未来 AHe 定年的新方向。AFT 的封闭温度为 120 °C 左右, 可用于重塑地壳上部 3~5 km 内数百万年以来的热历史^[64]。

近年来, 已有学者将磷灰石的热年代学应用于物源分析当中。如 Stock 等^[65] 利用 AHe 概率密度函数 (Probability Density Function, PDFs) 对美国加利福尼亚州内华达山脉 Inyo Creek 和 Lone Pine Creek 水系沉积物进行来源判别, Inyo Creek 水系沉积物 AHe 的 PDFs 预测峰值 (31 Ma) 与测定峰值 (33 Ma) 相似, 表明源区侵蚀速率一致和砾石随水流的快速搬运与堆积, Lone Pine Creek 水系沉积物 AHe 的 PDFs 预测峰值 (62 Ma) 与测定峰值 (41 Ma) 相差较大, 表明沉积物多源于低海拔流域, 缺乏年龄较老的沉积物是由于高海拔地区沉积物堆积于冰斗和快速抬升过程中的快速剥蚀; 常健等^[66] 在塔

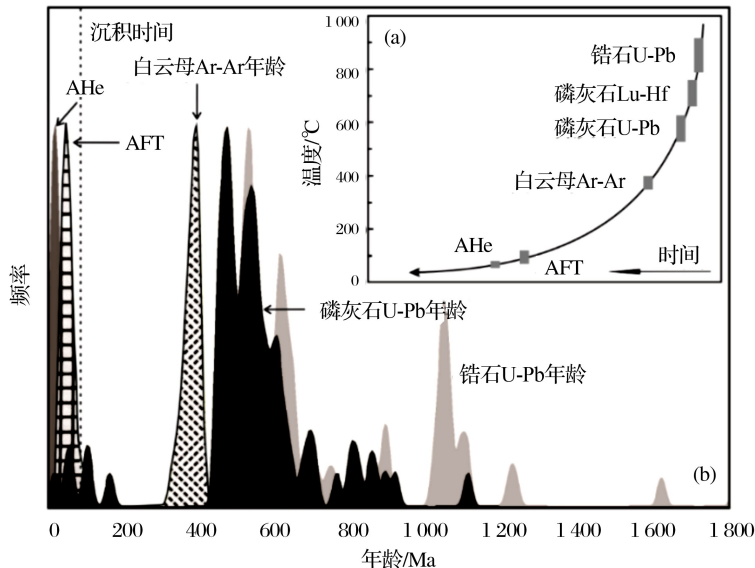


图 4 磷灰石多法定年示意图

Fig. 4 Illustration of Multi-dating of detrital apatite

(a) 岩石抬升、剥蚀过程中的热历史轨迹; (b) 多法定年峰值图; 数据来自参考文献^[55,56]

(a) The track of thermal history during lifting and exhumation; (b) The density diagrams of multi-dating; The data comes from references^[55,56]

里木盆地北缘与南天山构造—沉积耦合关系的研究中,测得塔北隆起地层和南天山 AFT 年龄分别为 10~24 Ma 和 11~16 Ma, AFT 良好的对应关系表明塔北隆起地层中的磷灰石来自南天山和库车拗陷北缘。

5.2.2 磷灰石 U-Pb 定年

磷灰石 U-Pb 体系封闭温度为 450~550 °C^[11,67],记录了磷灰石通过该温度段的时间,除了能获得磷灰石的高温热历史之外,还可以根据冷却速率推断其结晶时间,如 Danišik 等^[9]测得德国 Schwarzwald 矿床磷灰石 U-Pb 年龄为(289.5±4.5) Ma,根据半径为 0.5 mm 左右的磷灰石冷却时间为 10 °C/Ma^[68],推算其结晶年龄为(289.5±4.5)~(314±6) Ma。磷灰石 U-Pb 年龄可与低温热年代学信息相结合,成为物源分析的重要手段。

随着技术的不断提高,关于磷灰石的原位 U-Pb 测年方法近年来也有报道。周红英等^[69]结合前人研究,利用 LA-MC-ICP-MS 建立了磷灰石微区原位 U-Pb 同位素定年新方法,该方法克服了传统磷灰石 U-Pb 定年中普通铅含量高、放射性成因铅含量低、分析流程复杂等缺陷,从而获得了较为精确的磷灰石 U-Pb 年龄。

5.2.3 磷灰石多法定年

相比于锆石,磷灰石具有弱稳定性,即在酸性地表水条件下较易风化,因此可作为初次沉积旋回的代表矿物,直接反映源区信息,对于解释多旋回或多源区沉积来源具有一定优势。Carrapa 等^[55]和 Decelles 等^[56]对 Andean Puna 中央高原始新世沉积物来源和盆地沉降史的研究中,将碎屑磷灰石三法定年(即 U-Pb、AFT 和 AHe)、碎屑锆石 U-Pb 定年和碎屑白云母 Ar-Ar 定年结合,确定其源岩形成于前寒武—早显生宙时期,在志留纪—早石炭世发生抬升冷却,自早—中白垩世以来抬升速度加快并于始新世开始发生剥蚀,结果如图 4b 所示。Olivetti 等^[70]利用 AFT 和磷灰石 U-Pb 双法定年,对南极洲 Victoria 盆地沉积物进行物源判别,结果显示 AFT 年龄小于 40 Ma,磷灰石 U-Pb 年龄的 2 个峰值为 530 和 610 Ma,与 Victoria 南部 600 km 之外的 Beardmore 和 Scott 冰盖相对应;Zattin 等^[71]对南极洲西罗斯海沉积物物源判别的研究中,利用磷灰石 U-Pb 年龄和 AFT 年龄将源区物质分为快速冷却和缓慢冷却 2 类,快速冷却的火成磷灰石表明始新世—渐新世在 Mount Morning 大火成岩省前部存在一个未知的火山。缓慢冷却的磷灰石的 AFT 年龄比临近的中央山脉年轻,表明沉积物大部分来自

Discovery Accommodation 带,仅少部分来自 Royal Society 山脊,而 AFT 和 AHe 之间的差值表明始新世中央山脉的中等—快速的冷却事件。

5.3 磷灰石同位素地球化学

磷灰石的 Sr 和 Nd 含量较高而 Rb 含量较低,因此 Sr-Nd 同位素可以提供相应的地球化学信息,但是磷灰石中的 Sr 会有显著的成分分带现象^[72,73]。侯可军等^[74]利用 LA-MC-ICP-MS 技术,建立了磷灰石原位 Sr-Nd 同位素分析方法,可以避免成分分带带来的影响,提供更加精确的地球化学信息。

磷灰石 Lu-Hf 同位素常用 LA-MC-ICP-MS 方法测定,与传统的热电离质谱法相比,具有适用范围广、精确度高、流程简单、周期短的优点^[75]。Cherniak^[76]认为磷灰石中 REE 的封闭温度大于等于 700 °C,Barfod 等^[77]在美国纽约州 Adirondack 洼地的研究中认为磷灰石中 Lu-Hf 体系的封闭温度为 675~700 °C。根据上述研究,David 等^[8]保守估计磷灰石中 Lu-Hf 体系的封闭温度为 675~750 °C。磷灰石 Lu-Hf 年龄能够表示其形成年龄,而且与母岩全岩 Lu-Hf 年龄具有一致性^[78],因此可表示母岩的形成年龄,在一些母岩年龄较难测定时,磷灰石 Lu-Hf 为一种有效的解决途径。目前未见有碎屑磷灰石 Lu-Hf 体系应用于物源分析中的报道,但碎屑锆石 Lu-Hf 体系已被用于物源分析中^[79,80],由于磷灰石 Lu-Hf 年龄可表征母岩年龄,对母岩时代的限定存在一定潜力,或在将来成为物源分析的手段之一。

此外磷灰石的 Sm-Nd、O-S、O-C 同位素能够反映其形成时的地质环境^[81-83],主要应用于矿床成因分析、岩浆演化、变质及退变质作用、沉积条件再造等方面,在物源分析方面具有一定潜力,如 Malusà 等^[12]对意大利波河流域沉积物的研究中,首次报道了磷灰石 Sm-Nd 同位素在物源分析当中的应用。

6 结 语

碎屑磷灰石作为初次沉积旋回的代表矿物,蕴藏着大量的源区信息,是非常重要的物源指针,随着分析技术的进步和精度的提高特别是原位分析技术的出现,碎屑磷灰石在物源分析中的作用日渐增强。

由于不同来源的磷灰石具有明显差异,因此可以利用沉积区的碎屑磷灰石进行物源判别。碎屑磷灰石在物源判别中的应用可归纳为以下几个方面:①元素地球化学方面: CART、REE 参数二元图解投图和 REE 球粒陨石标准化配分模式;②年代学方面: AHe 年龄、AFT 年龄和 U-Pb 年龄及多法定年;

③同位素方面:磷灰石的 Sr-Nd 同位素、Lu-Hf 同位素等。

目前,国内在碎屑磷灰石物源判别的研究处于起步和探索阶段,并且存在一些问题亟需解决:①磷灰石的地球化学数据库仍需扩大,部分岩石特别是低级变质岩的磷灰石还需要开展大量的研究工作;②关于磷灰石 U-Pb 年龄的意义仍需要进一步确认;③部分类型岩石中的磷灰石存在成分分带,应确定一种方法避免成分分带对元素地球化学和年代学的研究带来影响。这些问题或成为碎屑磷灰石物源分析研究的新方向。

参考文献 (References):

- [1] Qian Tao, Wang Zongxiu, Liu Yongqing, *et al.* A provenance analysis of Jurassic sedimentary in southern Qaidam Basin stratigraphic sequence and chronological information by LA-ICP-MS [J]. *Science in China (Series D)*, 2018, 48(2): 224-242. [钱涛, 王宗秀, 柳永清, 等. 柴达木盆地北缘侏罗纪沉积物源分析: 地层序列及 LA-ICP-MS 年代学信息 [J]. 中国科学: D 辑, 2018, 48(2): 224-242.]
- [2] Yang Renchao, Li Jinbu, Fan Aiping, *et al.* Research progress and development tendency of provenance analysis on terrigenous sedimentary rocks [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(1): 99-107. [杨仁超, 李进步, 樊爱萍, 等. 陆源沉积岩物源分析研究进展与发展趋势 [J]. 沉积学报, 2013, 31(1): 99-107.]
- [3] Jian Xing, Guan Ping, Zhang Wei. Detrital rutile: A sediment provenance indicator [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(8): 828-846. [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.]
- [4] Eynatten H V, Dunkl I. Assessing the sediment factory: The role of single grain analysis [J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 115(1/2): 97-120.
- [5] Lisker F, Ventura B, Glasmacher U A. Apatite thermochronology in modern geology [J]. *Geological Society London Special Publications*, 2009, 324(1): 1-23.
- [6] Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly, *et al.* Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: Trace-element compositions and their relationship to host rock type [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2002, 76(1): 45-69.
- [7] Jian X, Guan P, Zhang W, *et al.* Late Cretaceous to early Eocene deformation in the northern Tibetan Plateau: Detrital apatite fission track evidence from northern Qaidam Basin [J]. *Gondwana Research*, 2018, 60: 94-104.
- [8] David M C, Spiking R A. Geochronology and thermochronology using apatite: Time and temperature, lower crust to surface [J]. *Elements*, 2015, 11(3): 189-194.
- [9] Danišik M, Pfaff K, Evans N J, *et al.* Tectonothermal history of the Schwarzwald ore district (Germany): An apatite triple dating approach [J]. *Chemical Geology*, 2010, 278(1/2): 58-69.
- [10] Morton A C, Hallsworth C R. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones [J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 124(1/4): 3-29.
- [11] Thomson S N, Gehrels G E, Ruiz J, *et al.* Routine low damage apatite U-Pb dating using laser ablation-multi collector-ICPMS [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2012, 13. DOI: 10.1029/2011GC003928.
- [12] Malusà M G, Wang J, Garzanti E, *et al.* Trace-element and Nd-isotope systematics in detrital apatite of the Po river catchment: Implications for provenance discrimination and the lag-time approach to detrital thermochronology [J]. *Lithos*, 2017, 290/291: 48-59.
- [13] Huang Xiaofen, Zhang Qin. A study on crystal structure of collophanite [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2011, 31(3): 566-570. [黄小芬, 张覃. 胶磷矿晶体结构研究 [J]. 矿物学报, 2011, 31(3): 566-570.]
- [14] Cai Xiucheng, Fu Yude. Several progress in study of apatite [J]. *Earth and Environment*, 1979, (10): 16-22. [蔡秀成, 富毓德. 磷灰石研究的某些进展 [J]. 地质地球化学, 1979, (10): 16-22.]
- [15] Webster J D, Piccoli P M. Magmatic apatite: A powerful, yet deceptive mineral [J]. *Elements*, 2015, 11(3): 177-182.
- [16] Yue Yuanzhen. Characteristics of the apatites of the volcanic complex in Lujiang-Zhongyang [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1983, (4): 12-16. [岳元珍. 庐枞地区中生代陆相火山杂岩中的磷灰石特征及其地质意义 [J]. 矿物岩石, 1983, (4): 12-16.]
- [17] Nash W P. Phosphate minerals in terrestrial igneous and metamorphic rocks [M] // Phosphate Minerals. Heidelberg: Springer Berlin, 1984: 215-241.
- [18] Harlov D E, Andersson U B, Förster H J, *et al.* Apatite-monazite relations in the Kiirunavaara magnetite-apatite ore, northern Sweden [J]. *Chemical Geology*, 2002, 191(1/3): 47-72.
- [19] Sha L K, Chappell B W. Apatite chemical composition by electron microprobe and laser-ablation inductively coupled plasma spectrometry, as a probe into granite petrogenesis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(22): 3 861-3 881.
- [20] Farley K A, Shuster D L, Ketcham R A. U and Th zonation in apatite observed by laser ablation ICPMS and implications for the (U-Th)/He system [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(16): 4 515-4 530.
- [21] Flowers R M, Kelley S A. Interpreting data dispersion and "inverted" dates in apatite (U-Th)/He and fission track datasets: An example from the US midcontinent [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(18): 5 169-5 186.
- [22] Ault A K, Flowers R M. Is apatite U-Th zonation information necessary for accurate interpretation of apatite (U-Th)/He thermochronometry data [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 79: 60-78.
- [23] Johnstone S, Hourigan J, Gallagher C. LA-ICP-MS depth profile analysis of apatite: Protocol and implications for (U-Th)/He thermochronometry [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013,

- 109;143-161.
- [24] Spiegel C, Kohn B, Belton D, *et al.* Apatite (U-Th-Sm)/He thermochronology of rapidly cooled samples; The effect of He implantation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 285(1):105-114.
- [25] Zheng Mengmeng, Zhang Lijuan, Lü Zeng, *et al.* Geochemistry of apatite from HP-UHP metamorphic belt in southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2017, 36(4):501-518.[郑萌萌, 张丽娟, 吕增, 等. 新疆西南天山高压—超高压变质带中磷灰石的地球化学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2017, 36(4):501-518.]
- [26] Tang Qian, Sun Xiaoming, Liang Jinlong, *et al.* Rare Earth Elements(REE) geochemistry of apatites in HP-UHP metamorphic rocks from Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) project and their implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(12):325-326.[汤倩, 孙晓明, 梁金龙, 等. CCSD HP-UHP 变质岩中磷灰石稀土元素(REE)地球化学及其示踪意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(12):325-326.]
- [27] Piccoli P M. Apatite in igneous systems[J]. *Phosphates Geochemical Geobiological & Materials Importance*, 2002, 48(1):255-292.
- [28] Böhn B, Wall F, Bas M J L. Rare earth element systematics of carbonatitic fluorapatites, and their significance for carbonatite magma evolution [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 2001, 141(5):572-591.
- [29] Zhu Xiaoping, Wang Zhonggang, Huang Yan, *et al.* REE content and distribution in apatite and its geological tracing significance[J]. *Chinese Rare Earths*, 2004, 25(5):41-45.[朱笑青, 王中刚, 黄艳, 等. 磷灰石的稀土组成及其示踪意义[J]. 稀土, 2004, 25(5):41-45.]
- [30] Hoche T, Moisescu C, Avramov I, *et al.* Microstructure of SiO₂-Al₂O₃-CaOP₂O₅-K₂O-F-glass ceramics needlelike versus isometric morphology of apatite crystals [J]. *Chemistry of Materials*, 2001, 13(4):1312-1319.
- [31] Li Yingyun. Some characteristics of igneous apatite[J]. *Geological Review*, 1963, 21(3):141-145.[李应运. 火成岩中副矿物磷灰石的某些特征[J]. 地质论评, 1963, 21(3):141-145.]
- [32] Nie Fengjun, Jiang Sihong, Liu Yan. Rare earth element features of apatite separated from the Heiyingshan high-grade iron deposit, Inner Mongolia [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2005, 26(5):435-442.[聂凤军, 江思宏, 刘妍. 内蒙古黑鹰山富铁矿床磷灰石稀土元素地球化学特征[J]. 地球学报, 2005, 26(5):435-442.]
- [33] Zhang Lejun, Zhou Taofa, Fan Yu, *et al.* A LA-ICP-MS study of apatite from the Taocun magnetite-apatite deposit, Ningwu Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(5):834-848.[张乐骏, 周涛发, 范裕, 等. 宁芜盆地陶村铁矿床磷灰石的 LA-ICP-MS 研究[J]. 地质学报, 2011, 85(5):834-848.]
- [34] Lan Caiyun, Zhao Taiping, Luo Zhengzhan, *et al.* The genesis of the Zhaoanzhuang Fe oxide deposit in Wuyang region of Henan Province; Insights from magnetite and apatite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(6):1653-1670.[兰彩云, 赵太平, 罗正传, 等. 河南舞阳赵案庄铁矿床成因: 来自磁铁矿和磷灰石的矿物学证据[J]. 岩石学报, 2015, 31(6):1653-1670.]
- [35] Zhou Lingdi, Wang Yangchuan. REE geochemical characteristics of apatite, sphene and zircon from alkaline rocks [J]. *Geochimica*, 1988, (3):224-233.[周玲棣, 王扬传. 碱性岩中磷灰石、榍石和锆石的稀土元素地球化学特征[J]. 地球化学, 1988, (3):224-233.]
- [36] Zhao Zhenhua, Bao Zhiwei, Qiao Yulou. A peculiar composite M-and W-type REE tetrad effect: Evidence from the Shuiquanguo alkaline syenite complex, Hebei Province, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15):1474-1488.[赵振华, 包志伟, 乔玉楼. 一种特殊的“M”与“W”复合型稀土元素四分组效应: 以水泉沟碱性正长岩为例[J]. 科学通报, 2010, 55(15):1474-1488.]
- [37] Liu Feng, Yang Fuquan, Li Yanhe, *et al.* Trace element and rare earth element characteristics of apatite from Abagong iron deposit in Altay City, Xinjiang [J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(3):251-264.[刘锋, 杨富全, 李延河, 等. 新疆阿勒泰市阿巴宫铁矿磷灰石微量和稀土元素特征及矿床成因探讨[J]. 矿床地质, 2009, 28(3):251-264.]
- [38] Frietsch R, Perdahl J A. Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types [J]. *Ore Geology Reviews*, 1995, 9(6):489-510.
- [39] Zhang Hui, Liu Congqiang. Tetrad effect of REE in apatites from pegmatite NO. 3, Altay, Xinjiang and its implications [J]. *Geochimica*, 2001, 30(4):323-334.[张辉, 刘丛强. 新疆阿尔泰可可托海 3 号伟晶岩脉磷灰石矿物中稀土元素“四分组效应”及其意义[J]. 地球化学, 2001, 30(4):323-334.]
- [40] Qiu Jiansheng, Zhang Xiaolin, Hu Jian, *et al.* In situ LA-ICP-MS analyses of apatites from carbonatites in western Shandong Province; Implications for petrogenesis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(11):2855-2865.[邱检生, 张晓琳, 胡建, 等. 鲁西碳酸岩中磷灰石的原位激光探针分析及其成岩意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(11):2855-2865.]
- [41] Chen Zhenyu, Zeng Lingsen, Meng Lijuan. Mineralogy and trace elemental geochemistry of apatite in Sulu eclogites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(7):1663-1677.[陈振宇, 曾令森, 孟丽娟. 苏鲁榴辉岩中磷灰石的矿物学和微量元素地球化学[J]. 岩石学报, 2009, 25(7):1663-1677.]
- [42] Xie Qilai, Chen Duofu, Qi Liang, *et al.* REEs geochemistry of Doushantuo phosphorites and modification during post sedimentary stages in Weng'an area, South China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(4):627-633.[解启来, 陈多福, 漆亮, 等. 贵州瓮安陡山沱组磷块岩稀土元素地球化学特征与沉积期后变化[J]. 沉积学报, 2003, 21(4):627-633.]
- [43] Wang Min, Sun Xiaoming, Ma Mingyang. Rare earth elements geochemistry and genesis of Xinhua large size phosphorite deposit in western Guizhou [J]. *Mineral Deposits*, 2004, 23(4):484-493.[王敏, 孙晓明, 马名扬. 黔西新华大型磷矿磷块岩稀土元素地球化学及其成因意义[J]. 矿床地质, 2004, 23(4):484-493.]
- [44] Boyton W V. Rare Earth Element Geochemistry [M]. New York: Elsevier Science Publishers, 1984:63-114.

- [45] Zhu Yongfeng, Massonne H J. Discovery of pyrrhotite exsolution in apatite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(2): 405-410. [朱永峰, Massonne H J. 磷灰石中磁黄铁矿出溶结构的发现[J]. 岩石学报, 2005, 21(2): 405-410.]
- [46] Liang Fenghua, Zeng Lingsen, Chen Jing, et al. Discovery of apatite with copper-bearing pyrrhotite exsolution in an eclogite from Rongcheng, eastern Shandong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(2): 433-438. [梁风华, 曾令森, 陈晶, 等. 胶东荣成榴辉岩中含铜磁黄铁矿出溶结构的磷灰石的发现及其意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(2): 433-438.]
- [47] Tang Qian, Sun Xiaoming, Xu Li, et al. Discovery of iron oxide, monazite and barite exsolutions in apatite veins in eclogite from the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) project and significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(7): 1 915-1 920. [汤倩, 孙晓明, 徐莉, 等. 中国大陆科学钻探 (CCSD) 榴辉岩磷灰石脉体中铁的氧化物、重晶石和独居石出溶物的发现及其意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(7): 1 915-1 920.]
- [48] Guo Haiyan, Xia Yong, He Shan, et al. Geochemical characteristics of Zhijin phosphorite type rare-earth deposit, Guizhou Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2017, 37(6): 755-763. [郭海燕, 夏勇, 何珊, 等. 贵州织金磷块岩型稀土矿地球化学特征[J]. 矿物学报, 2017, 37(6): 755-763.]
- [49] Broom-Fendley S, Brady A E, Wall F, et al. REE minerals at the Songwe Hill carbonatite, Malawi: HREE-enrichment in late-stage apatite[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 81: 23-41.
- [50] Belousova E A, Walters S, Griffin W L, et al. Trace-element signatures of apatites in granitoids from the mtisa inlier, northwestern Queensland[J]. *Journal of the Geological Society of Australia*, 2001, 48(4): 603-619.
- [51] Zeng Lingsen, Chen Jing, Gao Li'e, et al. The geochemical nature of apatites in high Sr/Y two-mica granites from the north Himalayan gneiss domes, southern Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(9): 2 981-2 993. [曾令森, 陈晶, 高利娥, 等. 藏南北喜马拉雅穹窿高 Sr/Y 二云母花岗岩中磷灰石地球化学特征及其岩石学意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(9): 2 981-2 993.]
- [52] Li Junjie. Preliminary study on the accessory minerals in granitoids in eastern Jilin and Heilongjiang Provinces[J]. *Geology and Resources*, 2005, 14(2): 103-107. [李俊杰. 吉黑东部花岗岩类中副矿物锆石、磷灰石、榍石的初步研究[J]. 地质与资源, 2005, 14(2): 103-107.]
- [53] Li Lixing, Li Houmin, Chen Zhenyu, et al. Occurrence and genesis of hornblende-associated nelsonite in northern Hebei Province, China: Evidence from apatite geochemistry[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(3): 380-388. [李立兴, 李厚民, 陈振宇, 等. 冀北与角闪岩岩相关铁钛磷灰岩的特征及成因——磷灰石矿物化学的证据[J]. 地质学报, 2014, 88(3): 380-388.]
- [54] Morton A, Yaxley G. Detrital apatite geochemistry and its application in provenance studies[J]. *Special Paper of the Geological Society of America*, 2007, 420(10): 319-344.
- [55] Carrapa B, Decelles P G, Reiners P W, et al. Apatite triple dating and white mica $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology of syntectonic detritus in the central Andes: A multiphase tectonothermal history[J]. *Geology*, 2009, 37(5): 407-410.
- [56] Decelles P G, Carrapa B, Gehrels G E. Detrital zircon U-Pb ages provide provenance and chronostratigraphic information from Eocene synorogenic deposits in northwestern Argentina[J]. *Geology*, 2007, 35(4): 323-326.
- [57] Zhou Yaoqi, Shi Bingjie, Li Su, et al. Geochemical research progress of accessory minerals[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(4): 59-70. [周瑶琪, 史冰洁, 李素, 等. 副矿物地球化学研究进展[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(4): 59-70.]
- [58] Jiang Yi, Chang Hong. Apatite (U-Th)/He dating: A review[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2012, 31(5): 757-766. [蒋毅, 常宏. 磷灰石(U-Th)/He 定年方法综述[J]. 岩石矿物学杂志, 2012, 31(5): 757-766.]
- [59] Wang Jie, Qin Jianzhong, Liu Wenhui, et al. Mesozoic tectonics and dynamic thermal history in Yuanba area of northeastern Sichuan basin: Application of (U-Th)/He dating of apatite and zircon[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2012, 34(1): 19-24. [王杰, 秦建中, 刘文汇, 等. 川东北元坝地区中生代构造与动态热演化史——磷灰石、锆石(U-Th)/He 定年分析[J]. 石油实验地质, 2012, 34(1): 19-24.]
- [60] Bao Zengkuan, Yuan Wanming, Wang Shicheng, et al. Apatite (U-Th)/He dating and its application[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2005, 24(2): 126-132. [保增宽, 袁万明, 王世成, 等. 磷灰石(U-Th)/He 定年技术及应用简介[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(2): 126-132.]
- [61] Wang Xiuxi. Applications of low temperature thermochronology in the tectonogeomorphology evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(3): 234-244. [王修喜. 低温热年代学在青藏高原构造地貌发育过程研究中的应用[J]. 地球科学进展, 2017, 32(3): 234-244.]
- [62] Zhang Weibin, Wu Lin, Wang Fei. Factor impacting the accuracy of apatite (U-Th)/He dating[J]. *Seismology and Geology*, 2016, 38(4): 1 107-1 123. [张伟斌, 吴林, 王非. 磷灰石(U-Th)/He 年龄准确度的影响因素[J]. 地震地质, 2016, 38(4): 1 107-1 123.]
- [63] Fu Shanling, Zhao Chenghai. Progress of in situ U-Th/He isotopic dating technique and its application to low temperature deposits[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2017, 36(1): 1-13. [付山岭, 赵成海. 原位 U-Th/He 同位素定年技术研究进展及其低温矿床学应用前景[J]. 岩矿测试, 2017, 36(1): 1-13.]
- [64] Shen Chuanbo, Mei Lianfu, Fan Yuanfang, et al. Advances and prospects of apatite fission track thermochronology[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2005, 24(2): 57-63. [沈传波, 梅廉夫, 凡元芳, 等. 磷灰石裂变径迹热年代学研究的进展与展望[J]. 地质科技情报, 2005, 24(2): 57-63.]
- [65] Stock G M, Ehlers T A, Farley K A. Where does sediment come from? Quantifying catchment erosion with detrital apatite (U-Th)/He thermochronometry[J]. *Geology*, 2006, 34(9): 725-728.
- [66] Chang Jian, Qiu Nansheng. Apatite low-temperature thermochro-

- nometry and applications to Tarim Basin in the northwestern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017,24(3): 79-93.[常健, 邱楠生. 磷灰石低温热年代学技术及在塔里木盆地演化研究中的应用[J]. 地学前缘, 2017, 24(3):79-93.]
- [67] Chen W, Simonetti A. In-situ determination of major and trace elements in calcite and apatite, and U-Pb ages of apatite from the Oka carbonatite complex: Insights into a complex crystallization history[J]. *Chemical Geology*, 2013,353(5):151-172.
- [68] Cherniak D J, Lanford W A, Ryerson F J. Lead diffusion in apatite and zircon using ion implantation and rutherford backscattering techniques[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991,55(6):1 663-1 674.
- [69] Zhou Hongying, Geng Jianzhen, Cui Yurong, et al. In situ U-Pb dating of apatite using LA-MC-ICP-MS [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012,33(6):857-864.[周红英, 耿建珍, 崔玉荣, 等. 磷灰石微区原位 LA-MC-ICP-MS U-Pb 同位素定年[J]. 地球学报, 2012,33(6): 857-864.]
- [70] Olivetti V, Balestrieri M L, Rossetti F, et al. Evidence of a full west Antarctic ice sheet back to the early Oligocene: Insight from double dating of detrital apatites in Ross Sea sediments[J]. *Terra Nova*, 2015,27(3):238-246.
- [71] Zattin M, Andreucci B, Thomson S N, et al. New constraints on the provenance of the ANDRILL AND-2A succession (Western Ross Sea, Antarctica) from apatite triple dating[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2013, 13 (10). DOI: 10. 1029/2012GC004357.
- [72] Zhang Wenlan, Shao Ji'an, Wang Rucheng, et al. Sr-rich apatite from the Dangzishan leucite-ijolite xenoliths (Heilongjiang Province): Mineralogy and mantle-fluid metasomatism[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010,55(33): 3 214-3 225.[张文兰, 邵济安, 王汝成, 等. 荡子山白榴霓霞岩包体中富 Sr 磷灰石的发现及其成因矿物学研究[J]. 科学通报, 2010,55(33):3 214-3 225.]
- [73] Zong Keqing, Liu Yongsheng, Gao Changgui, et al. Spatial variations of trace element and Sr isotopic compositions of apatite in eclogite from the CCSD main hole[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007,23(12): 3 267-3 274.[宗克清, 刘勇胜, 高长贵, 等. CCSD 主孔榴辉岩中磷灰石微区微量元素和 Sr 同位素组成研究[J]. 岩石学报, 2007,23(12):3 267-3 274.]
- [74] Hou Kejun, Qin Yan, Li Yanhe, et al. In situ Sr-Nd isotopic measurement of apatite using lase ablation multi-collector inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2013,32(4):547-554.[侯可军, 秦燕, 李延河, 等. 磷灰石 Sr-Nd 同位素的激光剥蚀—多接收器电感耦合等离子体质谱微区分析[J]. 岩矿测试, 2013,32(4):547-554.]
- [75] Ling Wenli, Cheng Jianping. New method and new technique for the high precision chronology of Lu-Hf isotopic[J]. *Geological Science and Technology Information*, 1998,17(3):85-90.[凌文黎, 程建萍. 高精度 Lu-Hf 同位素测定的新技术与新方法[J]. 地质科技情报, 1998,17(3):85-90.]
- [76] Cherniak D J. Rare earth element diffusion in apatite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000,64(22):3 871-3 885.
- [77] Barfod G H, Krogstad E J, Frei R, et al. Lu-Hf and Pb SL geochronology of apatites from Proterozoic terranes; A first look at Lu-Hf isotopic closure in metamorphic apatite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(7):1 847-1 859.
- [78] Larsson D, Söderlund U. Lu-Hf Apatite Geochronology of mafic cumulates; An example from a Fe-Ti mineralization at Smålands Taberg, southern Sweden [J]. *Chemical Geology*, 2005, 224(4):201-211.
- [79] Wang Tao, Wang Zongqi, Wang Dongsheng, et al. U-Pb and Hf isotopic data of detrital zircons from the Laohutang formation in the Wugongshan area, central Jiangxi Province: Constraint on sedimentary age and material source[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2018,39(2):167-178.[王涛, 王宗起, 王东升, 等. 江西武功山地区老虎塘组碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素: 沉积时代厘定及其源区特征[J]. 地球学报, 2018,39(2):167-178.]
- [80] Han Kunying, Xu Kejuan, Gao Linzhi, et al. U-Pb age and Lu-Hf isotope of detrital zircons from the meta-sedimentary rocks in the Yunkai region and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(9):2 939-2 956.[韩坤英, 许可娟, 高林志, 等. 云开地区变质沉积岩碎屑锆石 U-Pb 年龄、Lu-Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2017, 33(9):2 939-2 956.]
- [81] Nie Fengjun, Jiang Sihong, Liu Yan, et al. Sm-Nd isotopic dating of apatite separates from Heiyingshan high-grade iron deposit, Inner Mongolia [J]. *Mineral Deposits*, 2005, 24(2): 134-140.[聂凤军, 江思宏, 刘妍, 等. 内蒙古黑鹰山富铁矿床磷灰石钐-钕同位素年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2005,24(2): 134-140.]
- [82] Chen Qiyang, Feng Lanying. Sulphur and carbon isotopes of sedimentary apatite, Guizhou Province and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1996,12(4):594-597.[陈其英, 封兰英. 黔中沉积磷灰石的硫碳同位素及其地质意义[J]. 岩石学报, 1996, 12(4):594-597.]
- [83] Chu Tongqing, Shen Weizhou. Isotopic geochemistry of apatite from carbonatite in central Shandong[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1997,17(1):82-85.[储同庆, 沈渭洲. 鲁中碳酸岩中磷灰石同位素地球化学研究[J]. 矿物学报, 1997,17(1):82-85.]

Sedimentary Provenance Analysis Using Detrital Apatite: A Review^{*}

Zhang Shuo, Jian Xing^{*}, Zhang Wei

(State Key Laboratory of Marine Environmental Science, College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Fujian Xiamen 361102, China)

Abstract: In situ analysis of detrital apatite is a significant approach to sedimentary provenance analysis, which is an important aspect in sedimentary geology study. Several trace elements such as Sr, Y and Rare Earth Elements (REEs) concentrate in apatites, and the distribution of these elements depends on the content of SiO₂ and the distribution coefficient of the melt, thus the trace element abundances is obviously different in different rocks. These features can be used to indicate parent-rocks of detrital apatites in sedimentary rocks. The approaches and proxies of detrital apatite to sedimentary provenance analysis can be summarized as follows. ①elemental geochemistry, such as Sr, Y, REEs, the approaches including chondrite-normalised REE distribution patterns of apatites, Classification and Regression Tree (CART) and discriminant plots of REE parameters; ②isotopic geochemistry, including Sr-Nd and Lu-Hf isotopes; ③Multi-dating, including low-temperature thermochronology such as (U-Th)/He (AHe) and Fission Track (AFT) dating, and high-temperature thermochronology such as U-Pb dating. Based on an integrated analysis using these methods, we can get various and comprehensive geological information such as the rock type, formation conditions and evolution of source rocks, the history of uplift and exhumation of source areas and even the subsidence history of sedimentary basins. Although the low-temperature thermochronology of detrital apatite is widely used in sedimentary provenance analysis, the elemental and isotopic geochemistry, as well as the U-Pb dating, remains to be developed. These approaches are supposed to have wide application prospects in several research areas such as tectonics, sedimentary geology basin analysis and even paleoclimatology.

Key words: Apatite; Provenance; Elemental geochemistry; Isotopic geochemistry; Multi-dating.

* **Foundation item:** Project supported by the National Natural Science Foundation of China "Provenance of seasonal suspended sediments discharged by the Minjiang River: Constraints from trace elements and Sr-Nd isotopes" (No.41806052); The Natural Science Foundation in Fujian Province "Nd isotopes and provenance of the sediments in the Minjiang River mouth" (No.2017J05067).

First author: Zhang Shuo(1995-), male, Hanzhong City, Shaanxi Province, Master student. Research areas include sedimentary geology and sedimentary geochemistry. **E-mail:** zhangshuomarine@163.com

* **Corresponding author:** Jian Xing(1987-), Shanggao City, Jiangxi Province, Associate professor. Research areas include sedimentary geology and sedimentary geochemistry. **E-mail:** xjian@xmu.edu.cn