

沉积物锆石示踪研究进展

张 硕, 杨立辉*, 董有进, 赵亚军

(安徽师范大学地理与旅游学院安徽自然灾害过程与防控研究省级重点实验室, 安徽 芜湖 241002)

摘要: 锆石是指示沉积物物质来源的重要矿物, 通过几个典型指标来揭示物源区域与搬运过程。晶体形态反映锆石形成的酸碱环境与结晶温度, 粒度指示源区距离与搬运力的变化, 微量元素记录物源地地球化学信息与迁移过程, U-Pb 同位素的示踪测定锆石的年龄特征及物源区在时间尺度上的变化特征和空间尺度上的多样性。结合最新的研究理论成果, 重点探讨锆石物源示踪原理在沉积物研究中的应用, 并对锆石示踪技术在应用过程中出现的问题及研究方向提出一些看法。

关键词: 锆石; 示踪原理; 同位素; 应用

中图分类号: P588.1; P597+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-1891(2019)01-0058-06

Research Progress in Zircon Tracer for Sediment Matters

ZHANG Shuo, YANG Lihui*, DONG Youjin, ZHAO Yajun

(Anhui Provincial Key Laboratory of Natural Disaster Process and Prevention, School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241002, China)

Abstract: Zircon is an important mineral that indicates the source of sediment matters. Several typical indexes are used to reveal the source area and the migration process. The crystal morphology reflects the acid-base environment and crystallization temperature of zircon formation, the particle size indicates the change of source distance and migrating force, the trace elements record the geochemical information and migration process, and the U-Pb isotope tracer determines the age characteristics of zircon and the features of source region change on a time scale and the diversity of source regions in the spatial dimension. Based on the latest theoretical research results, this paper focuses on the application of zircon source tracing principle in sediment researches, and offers some views on the problems in the actual applications of zircon tracer technology and the technology's research directions.

Keywords: zircon; tracer principle; isotope; application

物源示踪是通过确定沉积物质来源及搬运路径, 重建地球环境构造演化的过程^[1,2]。地球化学(如Sr-Nd, Hf元素)、矿物学(如方解石, 白云石)、物理学(如热释光法, 电子自旋共振测年法)、气象观测与模拟等方法作为探讨沉积物源的重要手段, 已被地理学者运用到诸如黄土高原、近海海域等区域环境变迁的探索, 并取得一些新的成果^[3,4]。经过不断的理论深入和实践改进, 上述方法的运用越来越成熟。锆石(Zircon)是单颗粒碎屑矿物微区分析的重要指示矿物, 因其保存了大量的物源要素, 成为物源研究所选择的示踪物质。作为自然界最常见的副矿物之一, 广泛存在岩浆岩、变质岩和沉积岩中^[5]。通过分析锆石的形态特征、粒度、微量元素等具有直接示踪意义且性质稳定的指标, 借助U-Pb同

位素等地球化学工具, 对于研究古地理环境的构造历史, 有着非常重要的意义^[6,7]。

1 锆石晶体形态示踪

1.1 理论基础

锆石晶体属四方晶系, 晶面组合特征规则多变, 是典型的形态标型矿物^[8]。锆石晶体形态反映结晶环境, 保留的原生构造特征受地质作用的影响小, 是判断原岩类型的很好指标。对锆石晶体形态的初步分析主要包括磨圆度、颜色、包裹体等。例如, 在以风沙运输的环境中, 碎屑沉积物主要以机械磨损而圆化。随搬运距离的增加, 锆石颗粒逐渐由棱角状、次棱角状、次圆状到圆状^[9]。锆石的颜色多样, 透明度较好, 深浅度和U、Pb含量正相关, 而

U、Pb 含量越高,则表示母岩的形成时代越老^[10],同时也反映母岩结晶时的酸碱度。包裹体的存在则受锆石形成过程中经历的变质作用影响^[11]。对锆石晶体的形态研究发现,晶体大小与初始岩浆 Zr 的含量相关^[6],结晶介质的化学性质在锥形表面的发展中起主导作用,温度是控制晶体柱面生长的重要因子。

锆石晶体形态的定量描述,首推 Pupin 的锆石形态群法^[12],他将锆石柱面与锥面的组合称为群型,主要有(100)、(110)的柱面与(101)、(211)、(301)锥面或(101)+(211)结合等类型,而同一类型因晶面的相对发育程度称为亚类^[13,14]。在低碱环境中,锆石(211)锥面发育良好;过碱环境中,锆石(201)锥面发育良好。岩体形成温度高时,锆石(100)柱面发育良好;岩体温度低时,锆石(110)柱面发育良好^[15]。李长民^[16]对比岩浆锆石与变质锆石的晶体形态发现,岩浆锆石通常具有很好的柱状晶体,延长度(晶体长度与宽度的比值)大,而变质锆石因受变质作用的影响发育多晶面且晶面复杂,延长度小。

1.2 分析方法

HF 酸蚀刻图像、背散射电子(BSE)图像和阴极发光电子(CL)图像是揭示锆石晶体形态的主要方法。利用 HF 酸腐蚀锆石表面的程度不同可以了解锆石内部结构和蜕晶化的程度,虽操作简单但因破坏锆石表面的完整性,较少采用。BSE 是利用扫描电镜发射电子束照射样品,接收样品中原子核反弹回来的一部分入射电子而成像的技术^[17],通过图像的明暗程度来反映 U、Th 等大离子半径元素在锆石表面的分布信息和晶体情况。阴极发光主要是通过样品表面在阴极射线的轰击下,由电能转化为光辐射后的发光得到图像。岩浆结晶锆石通常是沿一个方向延伸的细长柱,大部分具有直线生长纹自形晶体,有振荡或扇形环带;而变质重结晶锆石晶体多为圆卵型、不规则状,具浑圆状的生长纹和内核,其环带多为黑色不分带^[18]。

1.3 实践应用

通过锆石晶体的分析与定量描述,一有助于确定原岩性质。Hmady 等^[19]收集尼罗河三角洲海滩区沉积物中的碎屑锆石样品,通过 CL 分析颗粒晶体多为自形,显示发育良好的振荡和扇形区,为岩浆锆石;其与埃及东南部沙漠的 Abu Swayel 地区花岗岩碎屑沉积物相似,认定为重要物源区。二是反映锆石颗粒的搬运距离。李恩菊^[20]研究巴丹吉林沙漠锆石样品中 85% 左右磨圆度低,呈棱角及次棱角状,显示其近源搬运的特征;剩余的表面呈毛玻

璃状、硬度高,次圆和圆状明显,可见受近源物源地的影响较大。张瀚之等^[21]建立了锆石形态与标准锆石群型的对应关系,并对北方六大沙地的物源进行讨论,得出了周围造山带是其物源的近源性,且物质混合度不高的结论。三锆石晶体形态记录的结晶环境及发育状况对利用锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素示踪也有一定的辅助作用。由于锆石通常显示是非均质生长带,可以了解哪些阶段导致年龄和 Hf 同位素的广泛分布,为进一步利用同位素揭示锆石物源做好基础。

表 1 锆石形态分类与标准锆石群型的对应关系^[12,21]

形态分类	群型发育情况	原岩类型
四方双锥柱状	(101)(211)面都较发育	中酸性-中性岩
四方双锥柱状亚类	(211)面较发育	碱性岩
短柱状	(101)面远比(211)面发育	碱性岩
短柱状亚类	柱面基本不发育	碱性岩
长柱状	(101)面发育	基性-超基性岩

2 锆石粒度示踪

2.1 理论基础

粒度是陆源碎屑物质的重要特征之一,通过粒度数据分析,可以有效的提取其中的物源和古气候信息,广泛应用于沉积物沉积过程、环境和动力机制的研究^[22]。基本思路是根据粒度特征对沉积相做出初步判断,再通过沉积物各粒度的含量与变化反映源区距离、搬运介质、搬运方式等内容,最后建立沉积物粒度与搬运介质之间的定量关系,获得物源与古气候环境的相关数据^[23,24]。在粉尘沉积物粒度研究中,锆石稳定的化学性质较高硬度,在搬运过程中最大程度的保留了原始粒度,受成壤作用影响小,良好的封闭程度使所包含的源区信息不会全部丢失,从而为探讨搬运力大小、寻找物源区提供了很好的支持^[25]。

2.2 分析方法

沉积物粒度测量简单、快速,粒度特征记录了较为连续的时间尺度上的动力特征和物源信息,常用的粒度分析方法主要有频率曲线、概率累积曲线和粒度参数。频率曲线指示每种粒度出现的频率,概率累积曲线统计一个比特定粒级颗粒大的粒度百分比,粒度参数包括平均粒度、中值粒度、标准偏差、峰度等体现沉积环境的定量化指标。

Pye^[26]发现不同粒度大小的颗粒在同一搬运介质的影响下会存在蠕移、跃移、悬移等搬运方式,搬运距离也有很大差异。孙博亚^[27]作出洛川黄土古土壤 11 个锆石样品和 1 个新近纪红粘土锆石样品的

粒度频率曲线均为单峰特征,显示出单一沉积相环境;黄土古土壤层除L24以外,粒度组成大体一致,细粒很少粗尾延伸,指示物源区大致相同,新近纪红粘土粒度组成则异于黄土古土壤。概率累积曲线上,黄土古土壤锆石细颗粒向粗颗粒转变的过程中30~70 μm段的累积增长速度快,除L24的锆石中值粒级和平均粒级多在40~50 μm之间,L24的平均粒度、中值粒度、大于60 μm的粗颗粒含量等明显增大,反映当时冬季风的加强及全球气候干冷化的趋势;新近纪红粘土细粒比重更小、粗粒比重大,累积增长幅度小于黄土古土壤,显示两者搬运动力、物质来源不同。

2.3 实践应用

广泛分布着以沙漠为代表的干旱地表沉积物的中国北方及蒙古、中亚等地,是亚洲粉尘沉积物的重要来源地,包含着丰富的锆石颗粒,为通过锆石粒度解读粉尘搬运路线和物源区范围提供了物质基础^[28]。李云等^[29]认为洛川黄土锆石粗粒组分(20~60 μm)代表沉积物成岩前的粉尘粒度特征,同时剖面上粉砂层L9和下粉砂层L15粒度分布特征相近,40~50 μm比重的上升指示其物源稳定,结合青藏高原隆升的影响初步认为其物源为黄土高原临近沙漠、中亚造山带等。程峰^[30]测得江西九江、成都胜利、广西小梅红土更新世碎屑锆石粒度主要分布在40~200 μm,大颗粒锆石比重大,认为多由近源母质经风化、河流短途搬运。

近年来,对河流沉积物来源的研究引起学术界的关注。Lawrence等^[31]研究流体动力学分馏对锆石在沉积环境中的影响,认为锆石的粒度与年龄存在一定关联性。Yang等^[32]则进一步通过锆石粒度与年龄的关系来推断长江沉积物的物源与演化,指出年轻锆石的粒度与年龄老的锆石相比更多样,并发现<63 μm的锆石主要分布在中下游地区,年龄较老的锆石平均粒度小于年轻锆石。邓凯等^[33]测得台湾兰阳溪和浊水溪各主要年龄段的锆石粒度基本相同,不同时间段所经历的沉积再回旋基本相似,与长江等大河得出的锆石粒度和年龄的关系相悖,因而在进行物源示踪时还需要考虑沉积回旋和区域岩性对锆石粒度、年龄关系的影响。

3 锆石微量元素示踪

3.1 理论基础

沉积物经历的地质过程可以反映在矿物的元素组成上,单颗粒矿物元素分析成为了解地质历史过程的基本要素。然而由于不同元素活动性存在

差异,沉积物受到风化成壤、水力分选、气候等作用影响,矿物组分发生变化使分析结果不能与源区地球化学特征相对应,给物源分析造成困难^[34]。Zr的原子序数是40,一般天然水体很难溶解。风化淋溶作用强烈的红土环境中,Dequincey等^[35]发现Zr仍保持稳定。自然界以氧化物和硅酸盐的形式存在,常在粗颗粒中富集,锆石是其重要的寄主矿物。除Zr以外,锆石中还保留U、Th、Hf等其他微量元素以及稀土元素(REE)。这些元素具有非迁移性,在表生地球化学过程中比较稳定,基本上反映了母岩的性质,因此在沉积物物源和构造背景的研究中应用广泛。

3.2 分析方法

一是通过锆石微量元素比值、含量等特征,来获取锆石类型、原岩性质的分析方法。Th/U是常用的判断锆石类型的比值元素,一般来说,Th/U>0.4被判定为岩浆锆石,而变质锆石的Th、U比值小于0.1^[36]。Belousova^[37]利用微量元素的变化图解及其含量统计图解,将不同类型锆石具有的微量元素特征进行区分。鲍学昭^[38]指出从基性、中性到酸性岩岩浆锆石ZrO₂/HfO₂的比值下降而U、Th含量上升。

二是锆石稀土配分模式分析可以有效的还原原岩性质和形成过程,将测试区与潜在物源区标准化稀土配分特征数据进行对比,最终获得物源区位置及构造信息。岩浆锆石没有受到诸如蜕晶化、重结晶等使内部晶格破坏及微量元素减少的过程而成为较为理想的测试对象^[34,39]。由于稀土元素的细微差异,HREE在强化学风化作用下以重碳酸盐和络合物的形式淋滤迁移,LREE则容易保存在风化残积物中,从而指示沉积环境的不同。程峰^[30]发现江西九江、成都胜利、广西小梅剖面不同层位锆石稀土配分模式大体相似,多数呈La至Lu逐渐陡倾的模式,Ce正异常Eu负异常,为岩浆锆石,反映各剖面不同沉积层物源大体一致;HREE陡倾则表明化学风化强度大,指示上地壳经化学风化剥蚀混合沉积所形成,物源更接近于长江、珠江流域等近源区。雷开宇^[40]研究杭锦旗直罗组锆石稀土配分模式与盆地北缘大青山等地基本吻合,其母岩为大青山等地的岩浆岩及前寒武纪的变质岩。

3.3 实践应用

在风积物研究中,刘连生^[41]分粒级探讨环县、西峰和洛川沉积物Zr/Rb与季风的的关系,采用沉降和离心的方法避免了过筛法中将大颗粒沉积物所含粒度较细锆石筛除的情况,提高了实验的准确性。贾丽敏^[42]发现伊犁昭苏剖面锆石稀土总量与粒度呈

正相关,并以此重建该地区末次冰期以来的气候变迁。在识别现代水系从源到汇的过程中,杨守业等^[43]报道长江水系锆石微量元素以低 Hf 低 Y 高 Pb 类为主,不同支流亦有差异,综合分析长江干流宜宾、重庆等段受金沙江、嘉陵江贡献较大。通过对近海海域研究分析,谭文化^[44]采集海南岛周边海域锆石研究,ZrO₂/HfO₂ 比值大显示物源为基性岩,得到的锆石配分模式呈 LREE 亏损、HREE 富集,Ce 明显正异常,显示其主要物源来自海南岛中级变质岩,逆时针流动的北部湾洋流使西部及西北部受到红河流域物质输送,得到的锆石特征与红河流域类似。

4 锆石 U-Pb 同位素示踪

4.1 理论基础

沉积物源区岩石定年、物源探讨进而揭示区域构造演化的过程中,同位素技术不可或缺。同位素定年的基本原理在于,保持封闭状态的岩石矿物内部原不稳定同位素(母体),按衰变定律逐渐转变为稳定同位素(子体),这一过程不受外界因素的影响,以时间尺度为记录单元,最终实现研究对象的定年^[34]。碎屑锆石性质稳定、封闭良好,不受沉积分选过程影响,在通过同位素获取年龄谱后可以与周围山脉出露岩体的年龄对比,了解各时期物源变化信息。这对于曾经出露地表已被剥蚀和经历构造活动降于地表以下的地层来说,尤为重要。

Pb 的扩展封闭温度可达 900 °C,在低于该温度时 U-Pb 同位素体系便停止与外界物质交换,受后期热扰动少,U-Pb 同位素测年是物源分析的有用工具^[45]。理论基础是根据放射性元素 238U、235U 和 232Th 衰变成 206Pb、207Pb、208Pb 的半衰期进行测定,像锆石这类 U 和 Th 的含量均超过 1% 的强放射性矿物最为适合,因此在碎屑锆石年龄测定最常用^[46]。

4.2 分析方法

高精度的锆石 U-Pb 年龄测定主要方法有同位素稀释热电离质谱(TIMS)、二次离子探针(SIMS)和激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS)3 种。TIMS 分为稀释法和蒸发法,对于地质历史简单的锆石得到的数据精确,但不适用于有多期生长事件的锆石颗粒^[47]。SIMS 对各种成因锆石的年龄都能精准获取,其不足在于分析时间长、仪器昂贵。LA-ICP-MS 通过激光直接对锆石进行微区取样,所需时间短且精度高,同时可获取稀土元素分析数据,最大的缺点是对锆石的破坏大,分析的锆石粒径大于 20 μm,对于较小形成环境复杂的锆石获得的定年信息不准确^[48]。

4.3 实践应用

在以黄土高原为代表的黄土覆盖区,曾方明等^[49]综合前人的研究建立了黑木沟、环县黄土与潜在源区的碎屑锆石 U-Pb 年龄谱,柴达木盆地、腾格里沙漠、蒙古戈壁是其可能物源。Stevens 等^[50]发现毛乌素沙漠西部锆石的 U-Pb 年龄谱与青藏高原东北部具有一致性,通过对比附近黄河沉积物的锆石年代分布特征提出黄河对物源的搬运作用。谢静等^[51]利用 Hf 同位素发现科尔沁沙地碎屑锆石在不同锆石 U-Pb 年龄组与华北克拉通东部和中亚造山带同时代锆石年龄组特征一致,并结合两处碎屑颗粒数所占比例证实为主要物源区。河流系统对构造和气候变化极为敏感,Anwar 等^[52]借助锆石 U-Pb 定年来理清印度河的沉积、运输过程及最终的物质来源区。地表运动会造成先前参与到印度河河流体系的一些单元而在现代则排除在体系之外,如 Yamuna 和 Ghaggar 河。王扬扬等^[53]运用锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素对长江及其支流进行物源分析的可能性,贾俊涛^[54]则利用锆石 U-Pb 年龄探讨长江物质来源在不同时期的变化和贯通历史。

5 锆石物源示踪研究的不足

(1) 锆石是重矿物,密度大,细粒锆石易受上风向影响,风力的分选性会降低锆石粒度对源区限定的精确程度^[4]。(2) 锆石主要存在于中酸性岩,而在 Si 不饱和、Zr 含量较低的超基性岩,很少有原生锆石结晶,这对利用锆石 U-Pb 同位素测定带来一定困难。(3) 碎屑锆石 U-Pb 年龄记录高温岩浆事件,低温岩浆—变质热液事件则很难测定,有可能影响到对物源重要信息获取^[45]。(4) 锆石各示踪指标对不同源区的区分能力存在差异,常会对某些关键源区区分效果不佳。(5) 锆石数学模型方法还没有形成一个完整体系,从定性向定量研究的转变还存在许多问题,这些正是锆石物源示踪体系中需要关注的重点。

因此在对研究区域的物源分析过程中,一方面对自身稳定性和物源代表性存疑的指标通过深入研究将不合适的部分加以改进或者剔除,尽可能降低示踪不清问题出现的频率;另一方面应结合锆石示踪的多个指标对研究区域作出综合判定,减少由各示踪指标自身所带来的局限性。借鉴沉积物判别分析、端元分析等数理统计方法构筑以锆石为基础的数学模型,同时根据不同的研究需要对石英、Sr-Nd 同位素、磁化率等示踪手段进行合理选择,从多角度寻找更多的数据来支持所获得的结论。对

于一些缺失物源信息的区域,一方面以增加采样点数量和扩大覆盖区范围的方式获取资料,另一方面积极寻找新指标来扩展物源示踪的研究思路与方法,形成更为完备的物源示踪体系。

参考文献:

- [1] 徐亚军,杜远生,杨江海. 沉积物物源分析研究进展[J]. 地质科技情报, 2007,26(3):26-32.
- [2] ZIMMERMANN U, SPALLETTI L A. Provenance of the lower paleozoic balcarce formation (tandilia system, buenos aires province, argentina): implications for paleogeographic reconstructions of SW gondwana[J]. *Sedimentary Geology*,2009,219(1-4):7-23.
- [3] 陈骏,李高军. 亚洲风尘系统地球化学示踪研究[J]. 中国科学:地球科学,2011(9):1211-1232.
- [4] QUAN C, CATHERINE K, LIUA Z. Late quaternary climatic forcing on the terrigenous supply in the northern South China Sea: input from magnetic studies[J]. *Earth and Planetary Science Letters*,2017,47(8):160-171.
- [5] HOKADA T, HARLEY S L. Zircon growth in UHT leucosome: constraints from Zircon-garnet rare earth elements (REE) relations in Napier complex, East Antarctica[J]. *Journal of Mineralogical & Petrological Sciences*, 2004, 99(4):180-190.
- [6] RUBATTO D. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the Link between U-Pb ages and metamorphism[J]. *Chemical Geology*, 2002, 184(1):123-138.
- [7] 吴元保,郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对U-Pb年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16):1589-1604.
- [8] 鲍学昭,李惠民,陆松年. 锆石微区喇曼光谱研究及成因标型意义[J]. 地质科学, 1998(4):455-462.
- [9] 焦耘. 北京密云沙厂层状麻粒岩中锆石的特征及成因[J]. 地质学刊, 1988(2):57-60.
- [10] VAVRA G. Systematics of internal Zircon morphology in major variscan granitoid types[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1994, 117(4): 331-344.
- [11] 王亚伟,刘良,廖小莹,等. 秦岭杂岩清油河斜长角闪岩多期变质的证据——来自锆石微量元素和包裹体的启示[J]. 岩石学报, 2016, 32(5): 1467-1492.
- [12] PUPIN J P. Zircon and granite petrology[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*,1980,73(3): 207-220.
- [13] PUPIN J P. Magmatic zoning of hercynian granitoids in France based Zircon[J]. *Schweizerische Mineralogische Und Petrographische Mitteilungen*, 1985,65:29-56.
- [14] 刘显凡,卢秋霞. 锆石形态标型特征及标型生长机制探讨[J]. 岩石矿物学杂志,1997(2):179-184.
- [15] HOSSEIN S, SEDIGHEH S,WOLFGANG S. Genetic classification of magmatic rocks from the alvand plutonic complex, Hamedan, Western Iran, based on Zircon crystal morphology[J]. *Chemie der Erde-Geochemistry*,2014,74(12):577-584.
- [16] 李长民. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J]. 地质调查与研究,2009,32(3):161-174.
- [17] PIDGEON R T, NEMCHIN A A , HITCHEN G J. Internal structures of Zircons from archaean granites from the darling range batholith:Implications for Zircon stability and the interpretation of Zircon U-Pb ages[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1998, 132:288-299.
- [18] HOSKIN P W O, SCHALTTEGGER U. The composition of Zircon and igneous and igneous and metamorphic petrogenesis [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003,53:27-55.
- [19] EL-NABY H H A, DAWOOD Y H. Testing the validity of detrital Zircon chemistry as a provenance indicator[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014,7(1):341-353.
- [20] 李恩菊,董治宝. 巴丹吉林沙漠沉积物的地球化学特征[J]. 河南科学, 2014(8):1565-1570.
- [21] 张瀚之,鹿化煜,弋双文,等. 中国北方沙漠/沙地锆石形态特征及其对物源的指示[J]. 第四纪研究, 2013,33(2):334-344.
- [22] 李昌志,王裕宜. 泥石流、冰碛和河湖沉积物的粒度特征及判别[J]. 山地学报, 1999,17(1):50-54.
- [23] 任明达,王乃梁. 现代沉积环境概论[M]. 北京:科学出版社,1985.
- [24] 陈骏,李高军. 亚洲风尘系统地球化学研究[J]. 中国科学D辑:地球科学,2011,41:1211-1232.
- [25] 孙东怀. 黄土粒度分布中的超细粒组及其成因[J]. 第四纪研究, 2006,26(6):928-936.
- [26] PYE, K., TSOAR, H. Aeolian sand and sand dunes [M]. London: Unwin Hyman, 1990.
- [27] 孙博亚. 洛川黄土碎屑锆石沉积学特征及其U-Pb年龄的物源区意义[D]. 西安:西北大学,2011.
- [28] LICHT A, DUPONTNIVET G, PULLEN A, *et al.* Resilience of the Asian atmospheric circulation shown by Paleogene dust provenance[J]. *Nature Communications*, 2016,7:12390.
- [29] 李云,宋友桂,聂军胜,等. 基于U-Pb定年和单颗粒锆石粒径分析示踪中国黄土高原黄土和红粘土物源[J]. 地质论评, 2014, 60(2): 380-388.
- [30] 程峰. 中国南方更新世红土沉积物的特征及其物源研究[D]. 武汉:中国地质大学, 2018.

- [31] LAWRENCE R L, COX R, MAPES R W, *et al.* Hydrodynamic fractionation of Zircon age populations[J]. *Geol Soc Am Bull*, 2011,123:295–305.
- [32] YANG S, ZHANG F, WANG Z. Grain size distribution and age population of detrital Zircons from the Changjiang (Yangtze) River System, China[J]. *Chemical Geology*, 2012, 296–297(6): 26–38.
- [33] 邓凯, 杨守业, 李超, 等. 台湾山溪型小河流碎屑锆石年代学和粒径分析[J]. *地质学报*, 2015, 89(S1): 7–8.
- [34] 戴塔根, 龚铃兰, 张起钻. 应用地球化学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005:16–26, 45–61.
- [35] DEQUINCEY O, CHABAUX F, CLAUER N, *et al.* Chemical mobilizations in Laterites: evidence from trace elements and ^{238}U – ^{234}U – ^{230}Th disequilibria[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(7):1197–1210.
- [36] HOKADA T, Harley S L. Zircon growth in UHT leucosome: constraints from Zircon–garnet rare earth element(REE) relations in Napier Complex, East Antarctica[J]. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 2004, 99: 180–190.
- [37] BELOUSOVA E A, GRIFFIN W L, O'REILLY S Y, *et al.* Igneous Zircon: trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143: 602–622.
- [38] 鲍学昭. 锆石中两种成分变化趋势及其成因标型意义[J]. *矿物学报*, 1995(4):404–410.
- [39] 赵振华. 副矿物微量元素地球化学特征在成岩成矿作用研究中的应用[J]. *地学前缘*, 2010, 17(1):267–286.
- [40] 雷开宇. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区直罗组碎屑锆石稀土元素特征及地质意义[J]. *延安大学学报(自然科学版)*, 2015, 34(4): 58–62.
- [41] 刘连文. 元素地球化学在海陆沉积古环境研究中的应用[D]. 上海: 同济大学, 2004.
- [42] 贾丽敏. 新疆伊犁盆地风成沉积的稀土元素特征及其物源和环境意义[D]. 福州: 福建师范大学, 2014.
- [43] 杨守业, 王中波, 李从先, 等. 长江水系沉积物的矿物化学与物源示踪意义[C]//第三届全国沉积学大会论文摘要汇编, 2004.
- [44] 谭文化. 海南岛周边海域底质碎屑矿物分布及其物源分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2007.
- [45] 章邦桐, 凌洪飞, 吴俊奇, 等. “花岗岩浆晶出锆石 U–Pb 体系的封闭温度 $\geq 850^\circ\text{C}$ ” 质疑——基于元素扩散理论、锆石 U–Pb 年龄与全岩 Rb–Sr 年龄对比的证据[J]. *地质论评*, 2013, 59(1): 63–70.
- [46] WU F Y, JI W Q, LIU C Z, *et al.* Detrital Zircon U–Pb and Hf isotopic data from the Xigaze fore–arc basin: constraints on transhimalayan magmatic evolution in Southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 2010, 271(1–2):13–25.
- [47] BARBONI M, SCHOENE B, OVTCHAROVA M, *et al.* Timing of incremental pluton construction and magmatic activity in a back–arc setting revealed by ID–TIMS U/Pb and Hf isotopes on complex Zircon Grains[J]. *Chemical Geology*, 2013, 342(19): 76–93.
- [48] 王岚, 杨理勤, 王亚平, 等. 锆石 LA–ICP–MS 原位微区 U–Pb 定年及微量元素的同时测定[J]. *地球学报*, 2012(5):763–772.
- [49] 曾方明, 向树元, 刘向军, 等. 黄土高原风尘堆积物源研究进展[J]. *地球科学*, 2014, 39(2): 125–140.
- [50] STEVENS T, CARTER A, WATSON T P, *et al.* Genetic linkage between the Yellow River, the Mu Us Desert, and the Chinese loess plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 78: 355–368.
- [51] 谢静, 杨石岭, 丁仲礼. 黄土物源碎屑锆石示踪方法与应用[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012(6): 133–143.
- [52] ALIZAI A, CARTER A, CLIFT P D, *et al.* Sediment provenance, reworking and transport processes in the Indus river by U–Pb dating of detrital Zircon grains[J]. *Global & Planetary Change*, 2011, 76(1): 33–55.
- [53] 王扬扬, 范代读. 长江流域岩体锆石 U–Pb 年龄与 Hf 同位素特征及沉积物源示踪意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013 (5):97–118.
- [54] 贾军涛, 郑洪波, 黄湘通, 等. 长江三角洲晚新生代沉积物碎屑锆石 U–Pb 年龄及其对长江贯通的指示[J]. *科学通报*, 2010, 55(z1): 350–358.

(责任编辑:曲继鹏)