

锆石 U-Pb 定年与微量元素分析的地质应用

杨甫^{1,2}, 陈刚³, 张文龙³, 田雯³, 田涛^{1,2}, 赵雪娇⁴

1. 国土资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 西安 710021
2. 陕西省煤田地质有限公司, 西安 710021
3. 西北大学地质系, 西安 710069
4. 陕西煤田地质勘查研究院有限公司, 西安 710021

摘要 锆石 U-Pb 定年与微量元素同时测定的原位微区分析是目前应用最广泛的地质测年方法之一, 对锆石形貌学、内部结构及地球化学特征进行深入研究, 是正确理解、解释锆石原位微区分析测年结果的关键。通过锆石的阴极发光图像 (CL)、背散射电子图像 (BSE), 结合锆石的 Th/U 比值及稀土配分模式曲线特征, 可判别不同锆石的成因类型; 通过锆石的微量元素分析, 可判别锆石寄主岩石的成因类型及形成环境; 利用 Ti 温度计可限定岩体的岩浆源区深度范围, 结合锆石寄主岩石类型及寄主岩石中深源包裹体的研究, 可进一步推断锆石母岩浆的起源。锆石 U-Pb 定年与微量元素分析相结合的地质测年方法, 已成功地应用于最大沉积地层时代限定、碎屑岩物源分析以及古洋盆演化过程约束等方面, 且具有强有力的发展前景。

关键词 锆石; U-Pb 定年; 微量元素; Th/U 比值; 稀土配分模式

锆石 ($ZrSiO_4$) 是岩浆岩、变质岩和沉积岩三大岩类中最常见的副矿物, 不仅具有极强的耐风化性和物理、化学稳定性, 而且具有很高的 U-Pb 体系封闭温度 ($>750^\circ\text{C}$), 形成后 Pb 的扩散封闭温度可以高达 900°C ; 来自古老地壳的锆石很少受到后期地质-热事件的影响。所以锆石是目前测定岩浆结晶和峰期变质作用年龄及地质温度计最理想的矿物。

近半个世纪以来, 同位素地质学在岩石学领域得到了广泛的应用, 所获得的年代学与地球化学数据为确定岩体的形成时代、演化及其地球动力学背景提供了重要参数。在 20 世纪 60—80 年代, Sr、Nd、Pb 等同位素地质理论蓬勃发展并逐渐成熟的形势下, Re-Os、Lu-Hf 等新同位素体系也在快速发展。直至 20 世纪 80 年代开始, 同位素稀释热电质谱仪 (ID-TIMS) 和离子质谱 (SIMS) 技术的应用, 推进了锆石 U-Pb 分析, 但这些方法不仅样品制备及化学分离程序复杂, 测试时间长、价钱高, 而且无法进行微区分析, 存在不同期锆石混合的缺陷。近年来, 随着微区定年 (SHRIMP) 技术和激光剥蚀等离子质谱 (LA-ICP-MS) 技术的出现, 使人们可以在单颗粒锆石上进行激光剥蚀原位取样, 剥蚀出的气溶胶通过载气载入高分辨 (多接收) 电感耦合等离子质谱进行原位微区的锆石 U-Pb 定年与微量元素的同时精确测定^[1-2]。通过锆石的

背散射电子图像 (BSE) 或阴极发光图像 (CL) 结合激光剥蚀等离子质谱方法获得的锆石的 U-Pb 年龄及微量元素的测定精度, 不仅与 TIMS 及 SIMS 技术测定的数据精度相当, 而且实现了单颗粒锆石的原位微区分析, 对样品的制备要求大大降低, 测试速度大大加快。特别是配合原位微区的锆石的 U-Pb 年龄测定及微量元素分析, 对该锆石的成因演化提供了重要的制约参数。

1 不同成因锆石内部结构特征

对锆石进行内部结构分析的方法主要有 3 种, 包括 HF 酸蚀刻法、背散射电子图像 (BSE) 和阴极发光图像 (CL)。第一种方法简单易行, 不需要大型的仪器设备, 但它可能会对锆石的内部结构形态造成不同的破坏作用。第二种方法不仅可以显示出锆石的内部形态及结构特征, 而且对于锆石表面特征 (如包裹体分布及裂隙发育) 提供直观的图像。第三种是目前使用最为广泛的揭示锆石内部特征的方法^[3]。

在大多数情况下, 锆石的阴极发光图像 (CL) 可以清晰地反映锆石内部结构特征, 是研究锆石内部特征的首选方法。由于阴极发光的特征差异主要取决于被测单矿物 (如锆石等) 中的一些微量元素, 而微量元素的地球化学特征变化对

收稿日期: 2015-12-10; 修回日期: 2016-05-19

基金项目: 国土资源部煤炭勘查与综合利用重点实验室自主科研项目 (ZZ2015-2); 中国地质调查局油气资源项目 (1212011220761)

作者简介: 杨甫, 博士, 研究方向为盆地构造与非常规天然气地质, 电子信箱: yangpu666@163.com; 陈刚 (通信作者), 教授, 研究方向为盆地分析与油气成藏地质学, 电子信箱: chengang@nwu.edu.cn

引用格式: 杨甫, 陈刚, 张文龙, 等. 锆石 U-Pb 定年与微量元素分析的地质应用 [J]. 科技导报, 2016, 34(18): 221-229; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.18.030

地质环境改变反映极度灵敏,因此锆石的阴极发光图像可以较准确地反映地质环境的变化。通过阴极发光图像的分析研究,可以了解锆石的形成演化历史,这对于研究认识地球早期的形成演化历史、大陆地壳的形成和演化、构造单元的岩浆作用和变质作用,以及构造-热演化史等地质问题具有重大的意义^[4]。

不同成因锆石显示的阴极发光图像有所差异,对判断不同成因锆石提供重要依据^[3-5]。岩浆锆石具有典型的岩浆振荡环带或扇形分带结构,振荡环带的宽度可能与锆石结晶时岩浆的温度有关,低温条件下的微量元素扩散速度慢,一般形成较窄/较细较密的岩浆环带;高温条件下微量元素扩散快,常常形成较宽的结晶环带。花岗岩中的锆石晶形一般较长,为柱状,韵律环带较窄且环带间发光反差较大,扇形环带较明显。

基性辉长岩锆石晶形常为等轴状、短柱状,发光环带较宽且反差较小,发光亮度常为渐变的,扇形环带不明显。来自幔源的锆石常常是他形,并且有无分带或弱分带的阴极发光图像。

基性-超基性岩中的锆石通常为短柱状或等轴状,柱面不发育,也有长柱状,阴极发光通常呈斑块状(布丁状),也可以发育韵律生长环带,但与花岗岩的韵律环带相比,环带一般较宽,或者环带之间的衬度反差一般较小,也发育扇形分带结构。变质锆石有其独特的内部结构特征,主要包括无分带、云雾状分带、弱分带、扇形分带、斑杂状分带和面状分带等。通过观察锆石的阴极发光图像,可以有目的地对锆石进行筛选。

2 锆石化学成分特征及地质应用

2.1 锆石 Th/U 比值

大量研究表明,锆石 Th/U 比值通常用来判断锆石的起源,并认为不同成因类型锆石具有不同的 Th、U 含量及 Th/U 比值^[6,7],一般来说,岩浆锆石的 Th、U 含量较高, Th/U 比值 > 0.4; 而变质锆石的 Th、U 含量较低, Th/U 比值 < 0.1^[5,8-9]。此外,有些岩浆锆石具有异常的 Th/U 比值,有的比值 < 0.1,而在部分碳酸岩样品中发现的岩浆锆石,其 Th/U 比值很高,有的甚至高达 10000^[7],这可能与初始熔体具有异常的 Th/U 比值有关。虽然 Th/U 比值是判别锆石成因类型的唯一地球化学标准,但是仅凭锆石的地球化学指标 Th/U 比值有时并不能很有效地鉴别出岩浆锆石和变质锆石。因此,要正确判别锆石的起源和成因类型,应该有效地结合锆石的外形特征、Th/U 比值、阴极发光图像、自形程度发育情况以及锆石稀土元素的分布进行综合判断。

2.2 锆石稀土元素

大量研究发现,锆石 REE 元素配分曲线通常用来判断锆石的起源^[7,10-11]。通常情况下,岩浆锆石具有明显的 Ce 正异常及 Eu 负异常, HREE 相对于 LREE 富集和陡峭上升的 REE 配

分模式。与岩浆锆石相比,变质锆石 HREE 含量的富集程度相对 LREE 含量的变化较大。在变质作用过程中,锆石是否发生了重结晶或者发生重结晶过程中是否混有熔体或流体的参与,都会明显地影响锆石稀土元素在含量和组分上的显著变化^[8]。特别是岩石中存在石榴子石时变质锆石显示出明显的 HREE 亏损, MREE-HREE 平坦模式,缺少 Eu 负异常^[7-8,12-15]和低的 Th/U 比值 (< 0.01),被认为多是榴辉岩相变质锆石的特征^[8,15-17]。

变质增生锆石的稀土元素配分模式曲线特征不仅与各个稀土元素进入锆石晶格的能力大小有关,而且还与锆石伴生的矿物种类有关(如石榴石、长石、金红石等),这些矿物的存在与否都会对变质作用的条件(如麻粒岩相、角闪岩相、榴辉岩相等)有重要的指示意义,锆石的 REE 元素组成可反映锆石原岩类型的变化,至少在某些特定情况下可以反映锆石与其他副矿物——例如石榴石(REE 总量低、HREE 亏损)^[3,8]或长石(负 Eu 异常)^[8,18]和金红石^[3]——的共生情况。

元素 Ce、Eu 异常的变化,通常用来详细解释锆石结晶过程和判别锆石相关原岩类型^[7,16]。大量研究认为,负 Eu 异常和正 Ce 异常是大陆岩浆锆石具有的特征^[7,13,15]。在球粒陨石标准化稀土配分模式中,岩浆锆石通常显示的是具有正 Ce 异常, Ce³⁺ (离子半径 $r=1.143 \times 10^{-10}$ m) 被氧化为 Ce⁴⁺ ($r=0.970 \times 10^{-10}$ m), 作用类似于 Zr/Hf, 这些元素被认为比其他 LREE 元素更容易被取代。因此,明显的正 Ce 异常的形成是由于 Ce⁴⁺ (相对于 La³⁺ 和 Pr³⁺) 在锆石中比其他矿物更加相容(取代 Zr⁴⁺、Hf⁴⁺、U⁴⁺、Th⁴⁺)^[19]。虽然,相对于 Ce³⁺, 过剩的 Ce⁴⁺ 被确定是在氧化条件下产生的,它可能从这些锆石晶体之前矿物中继承。对于锆石中显示的缺少正 Ce 异常和显示的负 Ce 异常讨论相对较少,在 Austroalpine 基底中石榴石角闪岩蚀变的锆石具有平坦的 LREE 配分模式而无明显的 Ce 异常,表明在变质锆石中不存在 Ce⁴⁺^[20]。此外,锆石中缺少正 Ce 异常认为是形成在相对还原条件下的月岩样品中^[21],具有不同于正常岩浆锆石具有正 Ce 异常的特征^[15,22]。宋国学等^[23]在研究阿尔泰山南缘阿舍勒盆地泥盆纪火山岩中古老锆石的稀土元素中的大部分测点表现为正 Ce 异常而部分测点表现为负 Ce 异常,认为锆石中同时出现负 Ce 异常和正 Ce 异常,反映锆石结晶于氧化-还原性不均一的环境。

在锆石晶格中,较小离子半径的 Eu³⁺ ($r=1.066 \times 10^{-10}$ m) 比较大离子半径的 Eu²⁺ ($r=1.250 \times 10^{-10}$ m) 更容易容纳,负 Eu 异常的大小通过 Eu²⁺/Eu³⁺ 比率量化,这取决于矿物从流体中结晶的氧化状态^[13,15-16,24]。然而锆石中缺少负 Eu 异常,通常解释为原岩中缺少斜长石(如金伯利岩、榴辉岩、正长岩)^[7-8,11,16,25-26],因此也有学者认为可通过锆石 Ce 异常和 Eu 异常特性判别锆石原岩类型^[7,26]。在进行锆石 U-Pb 同位素定年的同时,对锆石进行显微内部构造、结构以及微量元素分布特征等方面的综合研究,限定不同时代、不同类型锆石的形成环境,能够为锆石 U-Pb 年龄合理解释以及最大限度地有

效获取与之相关的地质构造信息提供有效的制约。

2.3 锆石微量元素

有研究认为, 锆石的微量元素分布特征与寄主原岩类型及结晶形成环境有关^[7,11,27-29]。Belousova 等^[7]对大量的岩浆锆石进行了微量元素分析, 结果表明不同类型的岩浆锆石可以通过其微量元素变化图解及微量元素含量统计分析树形图解来进行区分, 如图 1^[7]所示。例如, 锆石是来自于金伯利岩、碳酸盐岩、铁镁质岩(辉长岩+玄武岩)、花岗岩类、正长岩类(正长岩及歪碱正长岩)和正长伟晶岩, 正确率>80%^[7]。岩浆锆石的微量元素含量从超基性岩—基性岩—花岗岩有总体上增长的变化趋势, 金伯利岩中岩浆锆石的稀土元素总量小于 50 μg/g, 碳酸岩及煌斑岩中锆石的稀土元素总量为 600~700 μg/g, 基性岩中锆石的稀土元素总量约为 2000 μg/g, 而花岗岩类及伟晶岩中锆石的稀土元素总量则为百分含量

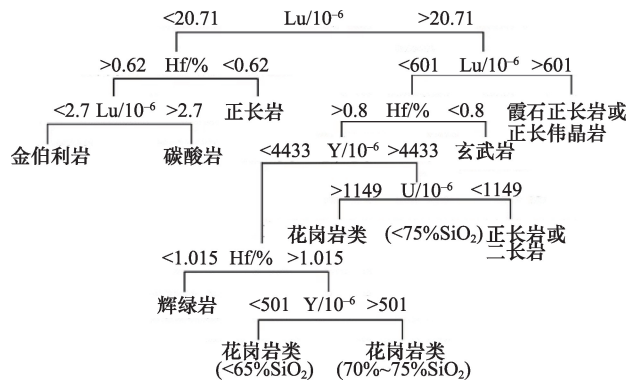


图 1 不同类型岩浆锆石的回归判别树形图解
Fig. 1 "Short" classification and regression trees for the recognition of zircons from different rock types

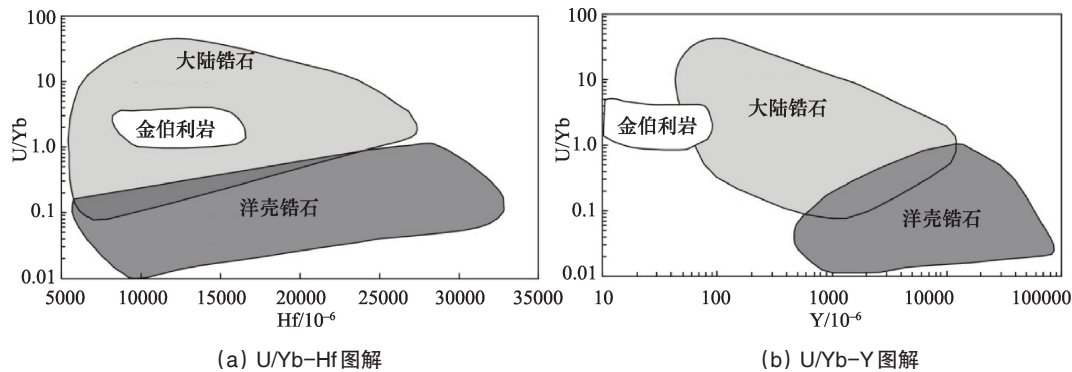


图 2 锆石形成环境的 U/Yb - Hf 及 U/Yb - Y 图解
Fig.2 Discriminant diagrams U/Yb vs Hf and Y for zircon environment

2.4 锆石 Ti 温度计

现今地学领域, 对锆石的研究越来越深入, 希望能从锆石身上获得更多的信息, 压力计和温度计都是主要的发展方向, 其中锆石 Ti 温度计已经获得较多的认可。随着 Watson^[37]对锆石的研究, 并发表锆石 Ti 温度计计算及应用文章, 锆石

级。由于锆石普遍存在于中酸性岩中, 基性岩中的锆石含量较少, 原岩类型判别结果显示的锆石原岩类型主要属于基性岩类, 合理的解释是其寄主中酸性岩中混入了较多的 Fe、Mg 物质, 可能与地幔物质的加入有关^[30-31]。锆石原岩类型树形图解也有不少的应用实例^[25,31-32], 例如张璐等^[31]对全吉地块基底岩系的碎屑岩中的锆石进行了 U-Pb 定年及微量元素的研究, 使用锆石原岩类型判别树形图解对晶形较好的岩浆锆石进行了原岩类型判别, 揭示出碎屑锆石的原岩类型主要是辉长岩及花岗岩, 结合锆石 U-Pb 年龄结果, 认为沉积岩的蚀源区全吉地块的基底性质是包含有花岗岩及中基性侵入岩的大陆地壳。但是, 也有学者对应用锆石稀土元素判别锆石原岩类型及其形成环境持怀疑态度, Hoskin 等^[14]通过分析认为不同火山岩中的岩浆锆石具有相似的稀土元素配分模式特征, 通过锆石的微量元素不能反映锆石的原岩类型。因此, 应用锆石的微量元素来判断寄主岩石的微量元素特征时应当谨慎^[3,4]。

Grimes 等^[28]通过对已知锆石环境的微量元素分析, 建立了 U/Yb-Hf 和 U/Yb-Y 分析图解, 如图 2 所示^[28], 有利地区分了来自于大洋环境(MORB)辉长岩和大陆地壳锆石的演化, 指出落入大陆地壳锆石范围内的锆石类型来自于岩浆演化(玄武质岩石的部分熔融), 而不是直接来自于类似于现今大洋中的脊玄武岩(MORB)^[33]。另外, 来自辉长岩和大洋环境(MORB)地壳相关锆石具有相对富集的磷矿组份(REE+Y+P)、较低的轻稀土(LREE)含量、明显的 Ce 正异常、较低的 U/Yb 比值以及相对亏损的中稀土含量(2Ho/(Gd+Yb) ≤ 1.19)^[34-35], 这主要是由于岩浆结晶过程中受辉石结晶的影响。例如, MORB 型辉长岩的微量元素特征显示为 Lu_N/Sm_N>105, Ce 异常>50, Eu 异常>0.3, Sm_N/La_N>26.6, U/Yb<1^[28,33,35-36]。

温度计的研究逐渐成为锆石研究中的一个新的发展方向。该温度计的使用有一个前提条件就是需要在 TiO₂ 饱和和环境下结晶的锆石, 金红石的 TiO₂ 能够和锆石中的 TiO₂ 达到平衡。在这样的条件下, 得到线性拟合方程

$$\log(\text{Ti}) = (6.01 \pm 0.03) - \left(\frac{5080 \pm 30}{T} \right) \quad (1)$$

公式(1)没有考虑活度及压力的影响。虽然在岩石中锆石结晶的时候,不能满足 TiO_2 饱和的条件,影响锆石 TiO_2 、 SiO_2 活度的主要因素为压力及固态体积扩散^[38-39],但是在一般的岩浆岩及变质岩中,依然能够满足 $\alpha_{\text{TiO}_2} > 0.5$ 的条件(α_{TiO_2} 是锆石中 TiO_2 活度),这时如果依然用这个方程计算,计算出的温度会偏低50~60℃。

Watson等^[40]结合人工合成锆石实验和温度-压力条件分析已知的天然锆石样品,拟合得到锆石Ti温度计的计算公式

$$t_{\text{zircon}} = \frac{5080 \pm 30}{(6.01 \pm 0.03) - \log(\text{Ti})} - 273 \quad (2)$$

式中, t_{zircon} 为锆石的结晶温度,℃。

根据对锆石与金红石的Ti温度计的对比研究^[41],锆石Ti温度计计算方法最大的难度在于Ti含量的精确测定,天然锆石Ti含量一般为 $0.1 \times 10^{-6} \sim 40 \times 10^{-6}$ (金伯利岩中锆石Ti含量为 $2 \times 10^{-6} \sim 60 \times 10^{-6}$)^[39,42],目前可以采用SIMS和LA-ICP-MS来测定锆石Ti含量。通过锆石Ti含量计算锆石的结晶温度,可大致限定岩体的岩浆源区深度范围,结合锆石寄主岩石类型和寄主岩石中的深源包裹体的研究,可反映母岩浆的起源^[43]。

3 锆石U-Pb定年及地质应用

同位素定年的基础是放射性衰变定律,通过测定母体及其衰变产生的子体的同位素含量,就可以利用衰变定律计算出母体形成以来的时间(年龄)。锆石U-Pb定年是利用U与Th同位素衰变成Pb同位素,锆石相对富含Th、U等放射性元素,而贫普通元素Pb,如果假设锆石形成时不含普通元素Pb,即测定的所有Pb为均放射成因,而且其封闭温度抗后期热事件影响能力强,是高精度地质年代学最佳应用方法。

3.1 岩体形成时代及后期热事件年龄

谐和图是锆石同位素地质年代学最常用的图解,以 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 为横坐标,以 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 为纵坐标。一致线上的点具有一致年龄,即 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 这3个表面年龄相等,表明被测对象自形成以来,同位素母体子体一直处于封闭体系中。不一致线上的点表示有Pb丢失或U获得的非一致年龄。

采自Sri Lanka的榴辉岩相变沉积岩锆石颗粒的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 与 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图如图3所示^[44]。一致线与不一致线有2个不同的交点,上交点被解释为样品的初始年龄,下交点代表的是一次铅丢失热事件或没有地质意义。老锆石颗粒与核部老锆石组成不一致线1,上交点3.2 Ga为碎屑锆石的源区年龄,下交点1.1 Ga为榴辉岩相变质作用时间。新生锆石颗粒(基于锆石不规则形貌)或增生锆石边部年龄组成不一致线2,上交点年龄1.1 Ga为榴辉岩相变质作用时间,下交点为现今一次铅丢失热事件,指示榴辉岩相事件过程中发生了锆石的增长^[44]。

对于岩浆岩、变质岩中的锆石而言,上交点、下交点分别为锆石中的U-Pb同位素组成点以及锆石环境的U-Pb同位

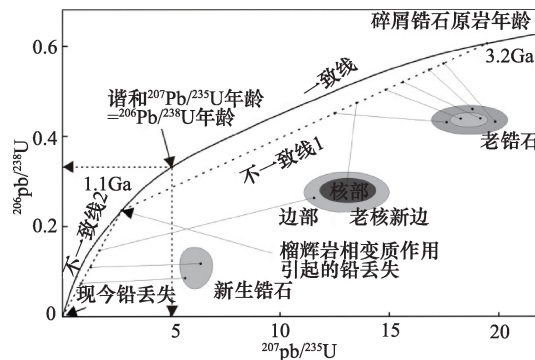


图3 锆石颗粒的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 与 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图
Fig. 3 Concordia diagrams of $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ for zircons

素组成点,由于U同位素、Pb同位素各自的分馏作用几乎可以忽略,因此锆石中的U-Pb丢失亦可视为其与环境之间的同位素均一化或混合作用,只是这种丢失因强度不同而不同,因而它们便分别落在该不一致线上的不同位置。一般认为,长英质岩石中的岩浆锆石上交点年龄代表锆石的结晶年龄;花岗质岩石中的继承锆石,是古老地壳的熔融或者是岩浆上侵过程中的捕获锆石,下交点年龄代表新生锆石的结晶年龄,上交点年龄代表地壳源区年龄;变质岩中的锆石上交点年龄代表原岩年龄,下交点年龄代表变质作用时间^[45-46]。对于变质岩中获得的锆石谐和年龄,可用于确定变质岩的原岩形成时代。

在未对锆石进行细致的形态学、内部结构及地球化学研究的情况下,仅根据一般的形貌及化学特征来确定锆石的成因类型是有所偏颇的,这将直接导致文献中常见的锆石年龄的多解性^[47]。例如,Xue等在大别山北部的片麻岩中获得的锆石U-Pb表面年龄,常常构成一条不一致线,并给出上交点及下交点2个年龄,对其有2种解释,一种认为下交点年龄代表原岩的形成年龄,而上交点年龄代表继承锆石的年龄^[48];另一种则认为上交点年龄代表原岩的形成年龄,而下交点年龄代表后期热变质事件的年龄^[49]。显然,避免这种锆石U-Pb年龄解释上的分歧的唯一途径,就是对作为定年样品的锆石进行直接而又深入的成因研究^[47]。

3.2 限定沉积地层时代

通过对沉积岩中的碎屑锆石U-Pb年龄结果的分析,可以根据沉积地层中未受到后期热液活动或者变质事件影响的岩浆锆石的最小年龄来限定沉积地层的下限年龄^[50-53],特别是对于缺少化石的前寒武纪地层^[54]以及显生宙变质沉积地层^[55]更具有优势。Dickinson等^[53]对于目前常用的以碎屑锆石年龄限定沉积地层下限年龄的方法做了详细介绍,将其分为以下4种类型。

1) 最年轻的单颗粒碎屑锆石年龄(YSG)。Dickinson等^[53]及Tucker等^[56]建议,在使用最年轻单颗粒锆石年龄来代表地层最大沉积年龄时,需要得到其他数据的验证,并且在

1 σ 之内需要覆盖次级年轻的锆石年龄值。

2) 最年轻的图解碎屑锆石年龄(YPP)。是指采用Excel的年龄频谱软件 Isoplot 计算完成的年龄峰值曲线中显示的最小锆石年龄峰值($n \geq 3$)^[53,57-58]。

3) 最小碎屑锆石年龄子集(YDZ)。是在锆石年龄处理软件 Isoplot 中使用蒙特卡洛分析方法在整个DZ群体中提取的最小碎屑锆石年龄的子集^[53,57]。

4) 加权平均年龄(YC1 σ , YC2 σ)。分别对应的是1 σ 和2 σ , 包含测试分析的单颗粒锆石年龄数据的最小年龄峰值区间的内部误差和外部误差^[53,54]。

Dickinson 等^[53]建议采用2个或至少是2个年龄($n \geq 2$)中最小的一个, 限制最大的沉积时代下限。但Tucker等^[56]建议采用至少3个年龄($n \geq 3$)限制最大的沉积时代下限, 其主要采用University of Arizona Laser Chron Center开发的年龄峰值程序(AGE PICK program), 利用碎屑锆石限定沉积地层的不同方法, 对澳大利亚昆士兰地区的温顿组进行了碎屑锆石年龄的研究。李双应等^[58]对出露在华北地台南缘霍邱-固始交界安阳山地区的地层时代争议较大的八公山群中的碎屑岩进行了锆石U-Pb年代学研究, 通过限定地层沉积下限年龄的单颗粒最小锆石年龄(YSG), 限定该套地层的最大沉积年龄为(860 \pm 22.2)~(877 \pm 22.6)Ma, 这一结果得到了锆石加权平均年龄值(YC1 σ , YC2 σ)和古生物化石证据的支持。同样, 孙蓓蕾等^[59]对太原西山上古生界含煤地层中的砂岩层段进行了碎屑锆石U-Pb年代学研究, 太原组底部晋祠(JC)砂岩及上部的七里沟(QLG)砂岩的YC1 σ 年龄分别为(296 \pm 4)Ma和(277 \pm 2)Ma, 且QLG-A中获得的主要峰值年龄区间为271~301 Ma($n=62$), 其中单颗粒最小锆石年龄(YSG)(271 \pm 7)Ma代表了其沉积时代下限, 并且应该包括 Asselian、Sakmarian、Artinskian、Kungurian 沉积期, 而不是其中所含牙形石确定的仅为 Asselian 沉积期, 这一结果对重新认识该地区的石炭-二叠系的地层划分提供了年代学的证据。虽然该方法在限定沉积地层时代方面取得了较好的应用, 但是有时采用这种方法限定地层的最大沉积年龄没有地质意义, 例如第五春荣等^[60]对秦皇岛地区新元古代的青白口系长龙山组石英砂岩84粒碎屑锆石进行了U-Pb年龄测定, 获得样品中最年轻锆石的年龄为2487 Ma, 然而最大沉积年龄与该组沉积岩实际沉积时限相差近1.5 Ga。因此, 采用碎屑岩中的锆石最小年龄或者最小年龄峰值限定地层时代时应该谨慎, 最大可能地结合其他地质条件进行约束, 例如目的层位中的古生物组合特征, 侵入岩或上覆地层以及地层中的凝灰岩夹层的年代学特征。

3.3 物源区分析

锆石作为碎屑沉积岩中最稳定的副矿物之一, 具有较好的抗风化能力及较高的同位素封闭温度, 可以在低级变质作用以及风化搬运过程中保持稳定, 成为近年来物源分析的有力工具^[61-64]。在采用沉积碎屑锆石进行物源分析时, 通常使用样品的碎屑锆石年龄分布曲线和潜在物源区的年龄分布

曲线(图4^[65])或者概率累计频率分布曲线(图5^[65])进行对比, 结果显示样品与参照2的年龄谱分布特征具有较好的相似性^[65]。

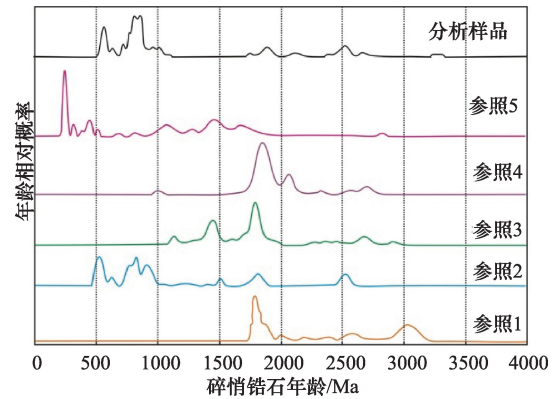


图4 碎屑锆石与潜在物源区年龄谱分布特征

Fig. 4 Age distributions from a sample and several reference data sets

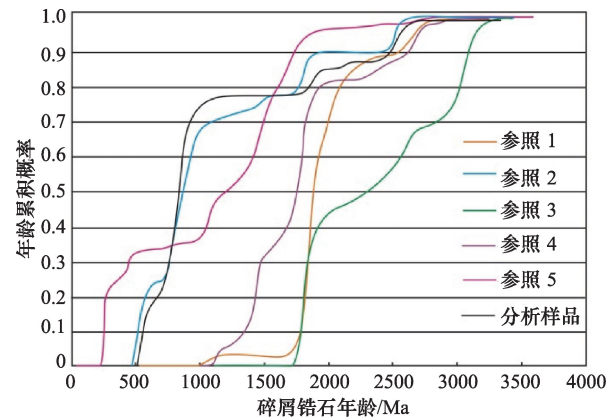


图5 碎屑锆石与潜在物源区年龄概率累计分布特征

Fig. 5 Cumulative age probability plot from a sample and several reference data sets

对于具有相似年龄谱峰值特征的多个样品($n \geq 2$)的物源区分析是目前碎屑锆石研究的焦点和难点。近年来通过柯尔莫诺夫-斯米尔诺夫检验(Kolmogorov-Smirnov test)来分析2组或2组以上的碎屑锆石样品年龄谱分布特征是否具有相似的正态分布和显著差异性, 已经有较多的应用, 并取得了较好的效果^[135,53,64,66-70]。如果通过K-S检验方法获得的概率 $P > 0.05$ (置信度大于95%), 表明2组或2组以上锆石年龄数据反映的沉积岩物源区没有显著差别, 其碎屑物质很有可能来自于同一物源区; 反之, 则表示它们的碎屑物质来自于明显不同的物源区。例如第五春荣等^[64]对华北克拉通南缘陕西省蓝田县灞源乡铁铜沟地区的铁铜沟组上层段(O1TT-01)和下层段(O1TT-02)碎屑样品, 分别进行了锆石U-Pb年龄测试分析和年龄结果的K-S检验, 经计算得到2件样品的碎屑锆石年龄的概率 $P < 0.01$, 表明它们的物源区组成有非常显著的差别。

3.4 约束古洋盆演化过程

对碎屑岩锆石进行物源分析,不仅可以通年龄谱的对比分析,限定沉积碎屑岩锆石的物质来源区,而且可以通过物源的变化推断与盆地相邻的造山带以及古洋盆的闭合时限。例如,Dong等^[71]对南秦岭黑河和武关地区刘岭群中的变质碎屑岩进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学的研究,结果显示存在400~600 Ma的主要峰值年龄区间,800~1100 Ma的次要峰值年龄区间,以及少量分布在700~800 Ma之间的锆石年龄数据,认为刘岭群的物质来源主要为北秦岭和南秦岭地区,而北秦岭地区为其主要的物质源区,进一步推断古秦岭洋(商丹洋)的闭合发生在泥盆纪早期,这一结果也得到了岩石地球化学^[72]和岛弧岩浆作用^[73-74]的证实。程胜东等^[75]选择西拉木伦河南北两侧的原志留纪地层进行碎屑岩锆石U-Pb年代学研究,通过碎屑岩的物源对比讨论古亚洲洋的闭合过程,结果显示北侧样品(LX0831-11)碎屑锆石年龄分布特征与南侧样品(130417-06)具有一致的泥盆-志留纪及晚元古代的年龄谱分布特征,代表兴蒙造山带的元古代碎屑锆石在南侧地区的出现,说明泥盆纪以来兴蒙造山带的剥蚀物已到达华北板块北缘,两者从泥盆纪开始即具有相同的沉积物源,进一步暗示华北板块与其北部松辽地块在中-晚泥盆世之前已经完成拼合^[75]。

4 结论

1) 不同成因锆石具有不同的结构及成分特征,记录了岩石所经历的复杂地质过程,仅使用任何一种判别指标都可能影响锆石成因类型的有效判定。只有将锆石的晶型、内部结构特征、稀土及微量元素特征等相结合进行综合研究,才可能对锆石成因做出正确的区分,才可能对内部结构复杂锆石的同位素及化学成分分析结果做出正确合理的地质解释,为寄主岩石的演化历史提供准确的年代学制约。

2) 不同成因锆石由具有其特征的微量元素组成。应用于基于锆石稀土及微量元素分布特征建立的“判别树”图解以及U/Yb-Hf与U/Yb-Y分析图解来判别锆石原岩类型和形成环境已取得了较大的进步,但也存在一些问题。

3) 在不同类型锆石内部结构详细观察基础上,通过对单颗粒锆石进行原位微区U-Pb定年、微量元素和Ti温度计等的多方位研究,能够系统提供锆石及其宿主岩石的年代学、成因环境等的丰富信息,使得在沉积地层时代、物质来源以及以前很难触及的古老地壳问题等方面的讨论更加现实。

参考文献(References)

[1] Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Geostandards Newsletter*, 2004, 28(3): 353-370.
[2] 柳小明, 高山, 第五春荣, 等. 单颗粒锆石的20 μm小斑束原位微区LA-ICP-MS U-Pb年龄和微量元素的同时测定[J]. *科学通报*, 2007,

52(2): 228-235.

Liu Xiaoming, Gao Shan, Diwu Chunrong, et al. Simultaneous in-situ determination of U-Pb age and trace elements in zircon by LA-ICP-MS in 20 μm spot size[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(9): 1257-1264.

[3] 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.

Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(15): 1554-1569.

[4] 周建雄, 陈振宇. 电子探针下锆石阴极发光研究[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2010: 1-104.

Zhou Jianxiong, Chen Zhenyu. Study on cathodoluminescence of zircon by electron probe[M]. Chengdu: Electronic Science and Technology University Press, 2010: 1-104.

[5] Crofu F, Hanchar J M, Hoskin P W O, et al. Atlas of zircon textures[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 469-495.

[6] Maas R, Kinny P D, Williams I S, et al. The earth's oldest known crust: a geochronological and geochemical study of 3900-4200 Ma old detrital zircons from Mt. Narryer and Jack Hills, Western Australia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(3): 1281-1300.

[7] Belousova E A, Griffin W L, 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(5): 602-622.

[8] Kinny P D, Wijbrans J R, Froude D O, et al. Age constraints on the geological evolution of the Narryer Gneiss Complex, Western Australia [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1990, 37(1): 51-69.

[9] 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

[10] Hinton R W, Upton B G J. The chemistry of zircon: variations within and between large crystals from syenite and alkali basalt xenoliths[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(11): 3287-3302.

[11] Belousova E A, Griffin W L, Pearson N J. Trace element composition and cathodoluminescence properties of Southern African kimberlitic zircons [J]. *Mineralogical Magazine*, 1998, 62(3): 355-366.

[12] Schaltegger U, Fanning C M, Günther D, et al. Growth, annealing and recrystallization of zircon and preservation of monazite in high grade metamorphism: Conventional and in-situ U-Pb isotope, cathodoluminescence and micro chemical Evidence [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, 134(2-3): 186-201.

[13] Whitehouse M J, Platt J P. Dating high-grade metamorphism—constraints from rare-earth elements in zircon and garnet[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2003, 145(1): 61-74.

[14] Hoskin P W O, Ireland T R. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator[J]. *Geology*, 2000, 28(7): 627-630.

[15] Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2003, 53(1): 27-62

[16] Bingen B, Austrheim H, Whitehouse M J, et al. Trace element signature and U-Pb geochronology of eclogite-facies zircon, Bergen Arcs, Caledonides of W Norway[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2004, 147(6): 671-683.

[17] Grant M L, Wilde S A, Wu F, et al. The application of zircon cathodoluminescence imaging, Th-U-Pb chemistry and U-Pb ages in inter-

- preting discrete magmatic and high-grade metamorphic events in the North China Craton at the Archean/Proterozoic boundary[J]. *Chemical Geology*, 2009, 261(1): 155-171.
- [18] Iizuka T, Horie K, Komiya T, et al. 4.2 Ga zircon xenocryst in an Acasta gneiss from northwestern Canada: Evidence for early continental crust[J]. *Geology*, 2006, 34(4): 245-248.
- [19] Xia Q X, Zheng Y F. Trace elements in zircon and coexisting minerals from low-T/UHP metagranite in the Dabie orogen: Implications for action of supercritical fluid during continental subduction-zone Metamorphism[J]. *Lithos*, 2010, 114(3): 385-412.
- [20] Schulz B, Klemd R, Brätz H. Host rock compositional controls on zircon trace element signatures in metabasites from the Austroalpine basement[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(3): 697-710.
- [21] Ireland T R, Wlotzka F. The oldest zircons in the solar system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 109(1): 1-10.
- [22] Hoskin P W O. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(3): 637-648.
- [23] 宋国学, 秦克章, 刘铁兵, 等. 阿尔泰山缘阿舍勒盆地泥盆纪火山岩中古老锆石的 U-Pb 年龄, Hf 同位素和稀土元素特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2010, 26(10): 2946-2958.
Song Guoxue, Qin Kezhang, Liu Tiebing, et al. The U-Pb ages, Hf isotope and REE patterns of older zircons from Devonian volcanic rocks in Ashele basin on the southern margin of Altai orogen and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(10): 2946-2958.
- [24] Gregory C J, Buick I S, Hermann J, et al. Mineral-scale trace element and U-Th-Pb age constraints on metamorphism and melting during the Petermann Orogeny (central Australia) [J]. *Journal of Petrology*, 2009, 50(2): 251-287.
- [25] Ma X, Shu L, Jahn B M, et al. Precambrian tectonic evolution of Central Tianshan, NW China: constraints from U-Pb dating and in situ Hf isotopic analysis of detrital zircons[J]. *Precambrian Research*, 2012, 222(3): 450-473.
- [26] Trail D, Watson E B, Tailby N D. Ce and Eu anomalies in zircon as proxies for the oxidation state of magmas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 97(1): 70-87.
- [27] Heaman L M, Bowins R, Crocket J. The chemical composition of igneous zircon suites: Implications for geochemical tracer studies[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(6): 1597-1607.
- [28] Grimes C B, John B E, Kelemen P B, et al. Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance[J]. *Geology*, 2007, 35(7): 643-646.
- [29] Hanchar J M, Van Westrenen W. Rare earth element behavior in zircon-melt systems[J]. *Elements*, 2007, 3(1): 37-42.
- [30] Belousova E A, Reid A J, Griffin W L, et al. Rejuvenation vs. recycling of archaean crust in the Gawler Craton, South Australia. Evidence from U-Pb and Hf-isotopes in detrital zircon[J]. *Lithos*, 2009, 113(3): 570-582.
- [31] 张璐, 巴金, 陈能松, 等. 全吉群碎屑锆石的 U-Pb 年龄谱和微量元素: 基底热事件信息和早期演化启示[J]. *地球科学*, 2012, 37(增刊 1): 28-37.
Zhang Lu, Ba Jing, Chen Nengsong, et al. U-Pb age spectra and trace elements of detrital zircon from Quanji Group implications for thermal events and early evolution in the basement[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(Suppl 1): 28-37.
- [32] 郑建平, 路凤香, 余淳梅, 等. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩捕虏体锆石 Hf 同位素、U-Pb 定年和微量元素研究: 华北下地壳早期演化的记录[J]. *科学通报*, 2004, 49(4): 375-383.
Zheng Jianping, Lu Fengxiang, Yu Chunmei, et al. Study of Hf and U-Pd dating and trace elements for zircon of granulite xenoliths in Hannuoba basalts: Record of early crust evolution in North China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(4): 375-383.
- [33] Liu Y, Gao S, Hu Z, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1-2): 537-571.
- [34] Liati A, Gebauer D. Constraining the prograde and retrograde PTt path of Eocene HP rocks by SHRIMP dating of different zircon domains: inferred rates of heating, burial, cooling and exhumation for central Rhodope, northern Greece[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, 135(4): 340-354.
- [35] Henrique-Pinto R, Janasi V A, Vasconcelos A, et al. Zircon provenance in meta-sandstones of the São Roque Domain: Implications for the Proterozoic evolution of the Ribeira Belt, SE Brazil[J]. *Precambrian Research*, 2015, 256(3): 271-288.
- [36] Grimes C B, John B E, Cheadle M J, et al. On the occurrence, trace element geochemistry, and crystallization history of zircon from in situ ocean lithosphere[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2009, 158(6): 757-783.
- [37] Watson E B, Harrison T M. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest Earth[J]. *Science*, 2005, 308(5723): 841-844.
- [38] Ferry J M, Watson E B. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2007, 154(4): 429-437.
- [39] Fu B, Page F Z, Cavosie A J, et al. Ti-in-zircon thermometry: Applications and limitations[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2008, 156(2): 197-215.
- [40] Watson E B, Wark D A, Thomas J B. Crystallization thermometers for zircon and rutile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 151(4): 413-433.
- [41] 高晓英, 郑永飞. 金红石 Zr 和锆石 Ti 含量地质温度计[J]. *岩石学报*, 2011, 27(2): 417-432.
Gao Xiaoying, Zheng Yongfei. On the Zr-in-rutile and Ti-in-zircon geothermometers[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(2): 417-432.
- [42] Page F Z, Fu B, Kita N T, et al. Zircons from kimberlite: new insights from oxygen isotopes, trace elements, and Ti in zircon thermometry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(15): 3887-3903.
- [43] 王清海, 许文良, 杨德彬, 等. 锆石中钛温度计在鲁西—苏北地区中生代侵入杂岩中的应用[J]. *岩石学报*, 2008, 24(10): 2331-2342.
Wang Qinghai, Xu Wenliang, Yang Debin, et al. Application of titanium-in-zircon thermometry to Mesozoic intrusive complex from the western Shandong and northern Jiangsu[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(10): 2331-2342.
- [44] Kröner A, Williams I S, Compston W, et al. Zircon ion microprobe dating of high-grade rocks in Sri Lanka[J]. *The Journal of Geology*, 1987, 95(6): 775-791.
- [45] Kröner A, Jaeckel P, Williams I S. Pb-loss patterns in zircons from a high-grade metamorphic terrain as revealed by different dating methods: U-Pb and Pb-Pb ages for igneous and metamorphic zircons from northern Sri Lanka[J]. *Precambrian Research*, 1994, 66(1): 151-181.
- [46] Mezger K, Krogstad E J. Interpretation of discordant U-Pb zircon ag-

- es: an evaluation[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1997, 15(1): 127-140.
- [47] 汪相, 陈洁, 罗丹. 浙西南淡竹花岗岩闪长岩中锆石的成因研究及其地质意义[J]. *地质论评*, 2008, 54(3): 387-398.
Wang Xiang, Chen Jie, Luo Dan. Study on petrogenesis of zircons from the Danzhu granodiorite and its geological implications[J]. *Geological Review*, 2008, 54(3): 387-398.
- [48] Xue F, Rowley D B, Tucker R D, et al. U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the North Dabie complex, Eastern Dabie shan, China[J]. *The Journal of Geology*, 1997, 105(6): 744-753.
- [49] Xie Z, Chen J F, Zhou T. U-Pb zircon ages of the rocks in Northern Dabie terrain, China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1998, 7(4): 501-512.
- [50] Rainbird R H, Hamilton M A, Young G M. Detrital zircon geochronology and provenance of the Torridonian, NW Scotland[J]. *Journal of the Geological Society*, 2001, 158(1): 15-27.
- [51] Surpless K D, Graham S A, Covault J A, et al. Does the Great Valley Group contain Jurassic strata? Reevaluation of the age and early evolution of a classic forearc basin[J]. *Geology*, 2006, 34(1): 21-24.
- [52] Brown E H, Gehrels G E. Detrital zircon constraints on terrane ages and affinities and timing of orogenic events in the San Juan Islands and North Cascades, Washington[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2007, 44(10): 1375-1396.
- [53] Dickinson W R, Gehrels G E. U-Pb ages of detrital zircons in Jurassic eolian and associated sandstones of the Colorado Plateau: Evidence for transcontinental dispersal and intraregional recycling of sediment[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2009, 121(3-4): 408-433.
- [54] Jones J V, Connelly J N, Karlstrom K E, et al. Age, provenance, and tectonic setting of Paleoproterozoic quartzite successions in the southwestern United States[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2009, 121(1-2): 247-264.
- [55] Barbeau D L, Duca M N, Gehrels G E, et al. U-Pb detrital-zircon geochronology of northern Salinian basement and cover rocks[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2005, 117(3-4): 466-481.
- [56] Tucker R T, Roberts E M, Hu Y, et al. Detrital zircon age constraints for the Winton Formation, Queensland: contextualizing Australia's Late Cretaceous dinosaur faunas[J]. *Gondwana Research*, 2013, 24(2): 767-779.
- [57] Ludwig K R. Isoplot v3.71: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: California, Berkeley Geochronology Center, 2009.
- [58] 李双应, 程成, 王松, 等. 华北地台南缘霍邱安山地区八公山群地层时代归属(青白口纪): 来自碎屑锆石年代学的制约[J]. *地质科学*, 2014, 49(2): 608-617.
Li Shuangying, Cheng Cheng, Wang Song, et al. Stratigraphy time of the Bagongshan Group in the Anyangshan area of Huoqiu County in the south margin of the North China Block (the Qingbaikou): Constraints from the detrital zircon chronology[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2014, 49(2): 608-617.
- [59] 孙蓓蕾, 曾凡桂, 刘超, 等. 太原西山上古生界含煤地层最大沉积年龄的碎屑锆石 U-Pb 定年约束及地层意义[J]. *地质学报*, 2014, 88(2): 185-197.
Sun Beilei, Zeng Fangui, Liu Chao, et al. Constraints on U-Pb dating of detrital zircon of the maximum depositional age for upper Paleozoic coal-bearing strata in Xishan, Taiyuan and its stratigraphic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(2): 185-197.
- [60] 第五春荣, 孙勇, 刘养杰, 等. 秦皇岛柳江地区长龙山组石英砂岩物质源区组成-来自碎屑锆石 U-Pb-Hf 同位素的证据[J]. *岩石矿物学杂志*, 2011, 30(1): 1-12.
Diwu Chunrong, Sun Yong, Liu Yangjie, et al. The protolith nature of quartz sandstone from Changlongshan Formation in Liujiang area, Qinhuangdao city: Evidence of U-Pb and Hf isotope from detrital zircon[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2011, 30(1): 1-12.
- [61] Geslin J K, Link P K, Fanning C M. High-precision provenance determination using detrital-zircon ages and petrography of Quaternary sands on the eastern Snake River Plain, Idaho[J]. *Geology*, 1999, 27(4): 295-298.
- [62] Cawood P A, Nemchin A A. Provenance record of a rift basin: U/Pb ages of detrital zircons from the Perth Basin, Western Australia[J]. *Sedimentary Geology*, 2000, 134(3): 209-234.
- [63] 胡波, 翟明国, 郭敬辉, 等. 华北克拉通北缘化德群中碎屑锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2009, 25(1): 193-211.
Hu Bo, Zhai Mingguo, Guo Jinghui, et al. LA-ICP-MS U-Pb geochronology of detrital zircons from the Huade group in the northern margin of the North China Craton and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(1): 193-211.
- [64] 第五春荣, 孙勇, 高剑峰, 等. 华北克拉通早前寒武纪构造-热事件性质探索: 铁铜沟组石英岩中碎屑锆石 U-Pb-Hf-O 同位素组成[J]. *科学通报*, 2013, 58(28-29): 2946-2957.
Diwu Chunrong, Sun Yong, Gao Jianfeng, et al. Early Precambrian tectonothermal events of the North China Craton: Constraints from in situ detrital zircon U-Pb, Hf and O isotopic compositions in Tietonggou Formation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(31): 3760-3770.
- [65] Gehrels G. Detrital zircon U-Pb geochronology: Current methods and new opportunities[M/OL]// *Tectonics of sedimentary Basins: Recent Advances*. Hoboken, USA: Wiley Online Library, 2011: 45-62. [2015-10-21]. <http://onlinelibrary.wiley.com>.
- [66] Berry R F, Jenner G A, Meffre S, et al. A North American provenance for Neoproterozoic to Cambrian sandstones in Tasmania[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 192(2): 207-222.
- [67] Drew J H, Glen A G, Leemis L M. Computing the cumulative distribution function of the Kolmogorov-Smirnov statistic[J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2000, 34(1): 1-15.
- [68] DeGraaff-Surpless K, Mahoney J B, Wooden J L, et al. Lithofacies control in detrital zircon provenance studies: Insights from the Cretaceous Methow basin, southern Canadian Cordillera[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2003, 115(8): 899-915.
- [69] Sircombe K N, Hazelton M L. Comparison of detrital zircon age distributions by kernel functional estimation[J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 171(1): 91-111.
- [70] Satkoski A M, Wilkinson B H., Hietpas J, et al. Likeness among detrital zircon populations: An approach to the comparison of age frequency data in time and space[J]. *GSA Bulletin*, 2013, 125(12): 1783-1799.
- [71] Dong Y P, Liu X M, Neubauer F, et al. Timing of Paleozoic amalgamation between the North China and South China Blocks: Evidence from detrital zircon U-Pb ages[J]. *Tectonophysics*, 2013, 586(2): 173-191.
- [72] Yan Z, Wang Z Q, Yan Q R, et al. Geochemical constraints on the provenance and depositional setting of the Devonian Liuling Group, East Qinling Mountains, central China: Implications for the tectonic evolution of the Qinling orogenic belt[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2012, 82(1): 9-20.

- [73] Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, et al. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(2): 213–237.
- [74] Wang X X, Wang T, Zhang C L. Neoproterozoic, Paleozoic, and Mesozoic granitoid magmatism in the Qinling Orogen, China: Constraints on orogenic process[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2013, 72(1): 129–151.

- [75] 程胜东, 方俊钦, 赵盼, 等. 内蒙古西拉木伦河两岸志留–泥盆系碎屑锆石年龄及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2014, 30(7): 1909–1921.
- Cheng Shengdong, Fang Junqin, Zhao Pan, et al. Detrital zircon ages of the silurian–devonian clastic rocks in south and north banks of Xar Moron River, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(7): 1909–1921.

Zircon U–Pb dating and its trace element analysis applied to geology

YANG Fu^{1,2}, CHEN Gang³, ZHANG Wenlong³, TIAN Wen³, TIAN Tao^{1,2}, ZHAO Xuejiao⁴

1. Key Lab of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, MLR, Xi'an 710021, China
2. Shanxi Coal Geology Group Co., LTD, Xi'an 710021, China
3. Department of Geology Northwest University, Xi'an 710069, China
4. Shanxi Coal Geology Investigation Ration Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710021, China

Abstract Zircon U–Pb dating and trace elements in situ microanalysis is one of the most widely used methods of geological dating. The zircon morphology, internal structure and geochemistry significance in-depth study are the key to properly understanding and interpreting the meaning of in situ microanalysis zircon dating. By zircon cathodoluminescence, backscattered electron images, combined with zircon Th/U ratios and the characteristic of REE distribution patterns, we can determine different types of zircon. Zircon trace elements can reflect genetic types and environment of host rocks. Zircon Ti thermometer may limit the depth of the magma source rock range. Combining zircon host rock types and the study of deep source inclusion in host rocks may further reflect the parent magma origin. Combination of zircon U–Pb dating and trace elements is an important method that has been successfully applied to determining maximum depositional age, provenance analysis, closure time of the paleo-ocean and so on. There is a strong development prospect for it.

Keywords zircon; U–Pb dating; trace elements; Th/U ratios; REE distribution patterns

(责任编辑 韩星明)