

锆石成因矿物学与U-Pb同位素定年应用

王一丁

桂林理工大学, 地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2022年2月15日; 录用日期: 2022年3月4日; 发布日期: 2022年3月11日

摘要

在自然界中锆石稳定性好, 可以有效保存源区的原始信息, 从而使得锆石成为国内外学者研究的重要矿物。通过对不同成因锆石(岩浆锆石、变质锆石、热液锆石)的晶型、内部结构、包裹体特征以及微量元素特征进行总结和评述, 在不同的环境下锆石所形成的结构类型有很大的差异。简述了4种(ID-TIMS、SIMS、LA-ICP-MS以及LA-MC-ICP-MS) U-Pb同位素定年测定方法的基本原理、优点和不足。此外结合实例, 运用不同成因锆石的定年结果, 结合锆石矿物学和区域地质背景将得出的年龄合理的应用于地质过程中。

关键词

锆石, 成因类型, U-Pb同位素定年

The Review of Zircon Genesis Mineralogy and U-Pb Isotope Dating

Yiding Wang

School of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Feb. 15th, 2022; accepted: Mar. 4th, 2022; published: Mar. 11th, 2022

Abstract

Zircon has good stability in nature, which can effectively preserve the original information of the source area, thus making zircon an important mineral studied by scholars at home and abroad. Through the summary and comment on the crystal form, internal structure, inclusion characteristics, and trace element characteristics of zircon of different genesis (magma zircon, metamorphic zircon, hydrothermal zircon), the structural types of zircon formed by zircon are very different in different environments. The basic principles, advantages, and disadvantages of four (ID-TIMS, SIMS, LA-ICP-MS, and LA-MC-ICP-MS) U-Pb isotope dating methods are briefly described. In addi-

tion, combined with examples, the dating results of zircon of different genesis are used, combined with zircon mineralogy and regional geological background, the age obtained is reasonably applied to the geological process.

Keywords

Zircon, Genesis Type, U-Pb Isotope Dating

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

锆石($ZrSiO_4$)为硅酸盐矿物,属于四方晶系,是一种存在于各类岩石中的副矿物,由于具有极低的吉布斯能[1],故具有稳定的晶体结构,在各种环境中结晶较易,因此在地质形成过程中锆石可以记录多种地质事件,保存多种地质信息。锆石具有较高的硬度,晶型良好,但随着生长环境的不同,生长的特点会有不同[2],这是因为地下的温度、流体活动等影响,使得锆石在生长过程中形成不同种类的锆石。例如,1980年Pupin提出了花岗岩岩石内锆石的形态,将锆石晶型分为64种并且可以判断出锆石结晶的物理化学条件[3][4]。

由于锆石稳定性高,在地质演变过程中可以长时间保持稳定的物理化学特征,同时具有低普通铅特征以及富U、Th等放射性元素,故在地质中经常被用于U-Pb同位素定年的理想对象。因此,对不同成因锆石的特征以及U-Pb同位素定年进行分析研究,可以为矿物岩石、甚至矿床的年龄进行确定。本文通过对国内外文献阅读及分析,系统地总结出不同成因锆石的特征;通过实例将所得到的U-Pb同位素年龄结合锆石的矿物学方面的研究,对所得到的年龄赋予更加合理的地质解释,也为今后U-Pb年龄解释提供一些思路和见解。

2. 不同成因的锆石

由于锆石形成时的环境各不相同,且形成后可能还会经受过变质作用以及热液作用的改造,故锆石的组成较为复杂,成因多样。

2.1. 岩浆锆石

岩浆锆石是指直接从岩浆中结晶出来的锆石,通常存在于含硅中等饱和以及饱和的岩浆岩中,晶体多为半自形-自形。岩浆锆石的晶体通常来说,受制于岩浆的成分和温度,偏碱性岩石中的锆石,锥面和柱面发育,晶体呈短柱或四方双锥状;酸性岩石中锆石的柱面和锥面也较发育,晶体呈柱状[5];基性-超基性岩中的锆石具有不规则的形状,例如产于金伯利岩和玄武岩的锆石多为它形[6][7]。阴极发光电子(CL)图像可见锆石内部结构,据前人研究岩浆锆石具有明显的振荡环带(图1),说明在锆石中的微量元素分布不均匀。振荡环带的宽度可能与锆石所存在的母岩成分以及结晶时的温度有关。高温条件下,通常形成中基性岩浆,环带较宽(图1(a));温度低时通常形成酸性岩浆,形成环带较窄(图1(b))。有时锆石中还可能出现扇形分带的结构(图1(c))。岩浆锆石内部包裹体矿物不常见,若有矿物通常为高温矿物,如磷灰石、金红石等。此外,锆石的微量元素及稀土元素也可以作为判别锆石的成因类型的标志之一,岩浆锆石的微量元素从超基性岩-中酸性岩-酸性岩总体呈上升的趋势[8]。Th、U的含量高、Th/U比值较大,

通常大于 0.4，但有些岩浆锆石的 Th/U 非常低(小于 0.1)，因此仅凭 Th/U 比值来区分锆石的成因并不准确。此外，岩浆锆石还呈现出 LREE 亏损，HREE 富集，La 到 Lu 的含量逐渐升高，Ce 正异常，Eu 负异常的特征(图 2)。

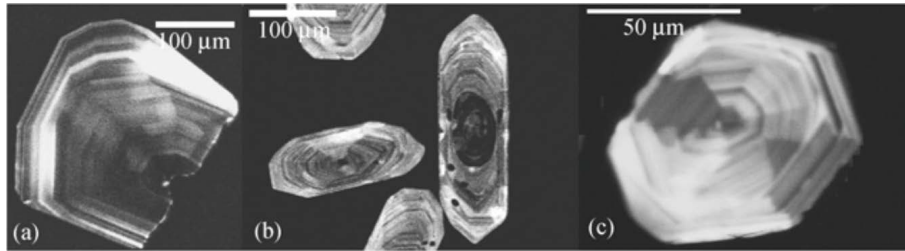
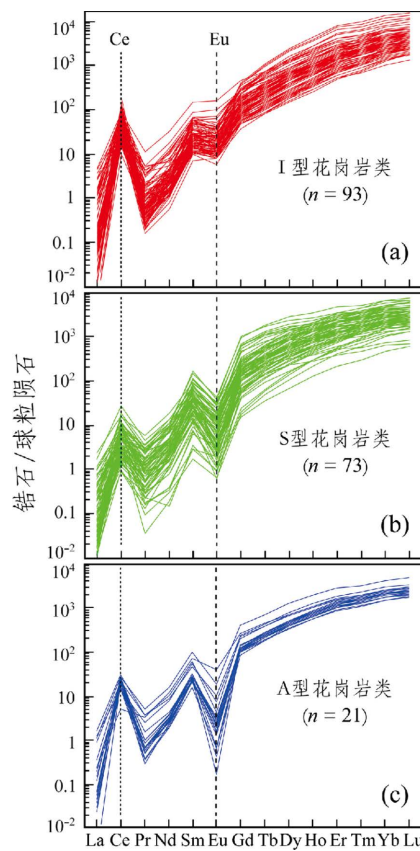


Figure 1. Magmatic zircon CL image (according to literature [7])
图 1. 岩浆锆石 CL 图像(据文献[7])



(a) 辉长岩中岩浆锆石 (b) 花岗岩中岩浆锆石 (c) 花岗岩中岩浆锆石扇形分带

Figure 2. Standardized pattern diagram of I, S, A granite REE chondrite meteorites (according to literature [8])

图 2. I、S、A 型花岗岩 REE 球粒陨石标准化型式图(据文献[8])

2.2. 变质锆石

变质锆石主要有两种形成类型：① 在变质过程中新生成的锆石；② 原岩中的锆石经不同程度的改造形成。变质锆石包括变质增生锆石和变质重结晶锆石。变质锆石具有它形到自形的晶体形态，通常不同变质条件下形成的锆石具有不同的形态和不同的内部结构。例如。变质增生锆石可以是新生成的，也

可以在原来锆石的外围新生成的增长边,因此这类锆石具半自形-它形,清楚可见原岩残留锆石与新生锆石的界限,内部包裹体较常见,通常有石英、斜长石等,此外还可见金刚石、石榴石等超高压矿物。变质重结晶锆石是原有的锆石经过重新结晶生成的新锆石,通常为自形-半自形,环带往往与原岩锆石中的环带相似,内部可见较多的暗色包体。变质锆石 Th、U 含量普遍很低, Th/U 比值一般小于 0.1,但在不同机制下的变质锆石,微量元素的差别很大。重结晶的锆石常常会继承于原岩锆石的特征,微量元素的含量较高;变质增生锆石由于对原岩进行改造而形成的,微量元素较原岩锆石和重结晶锆石低。相对于岩浆锆石来说变质锆石 HREE 含量较低, Ce 呈正异常、Eu 不存在或为弱异常。

2.3. 热液锆石

热液锆石是指从热液流体中直接结晶的锆石或者经热液流体侵蚀或改造的锆石。结晶形成的热液锆石自形程度为它形-自形,主要为短柱状, CL 图像上可见模糊环带-无环带、扇形环带;被热液叠加或改造的锆石内部结构复杂,自形程度低,若锆石以增生的形式叠加在岩浆锆石之上,可见双层结构。热液锆石的包裹体通常可见热液矿物,如电气石、黄铁矿等以及低盐度的 H_2O-CO_2 流体包裹体,热液锆石中 Th、U 含量以及 Th/U 的值规律不明显,据前人对澳大利亚 Boggy Plain 岩石中微量元素研究,对比岩浆锆石 REE 总量高、LREE 富集、Ce 的正异常较弱,但是对澳大利亚 Mole 花岗岩微量元素研究得出 REE 总量低于岩浆岩总量、HREE 富集、Ce 呈正异常较强,推测造成这样的原因与热液流体的来源、物质组成等性质有关。

3. U-Pb 同位素定年原理

同位素定年原理是在封闭体系中,利用放射性衰变定律,在测定矿物母体的基础上,将衰变而得到的子体同位素进行测定,然后推算出同位素形成时的年龄[9][10][11][12]。在锆石 U-Pb 同位素中是将 ^{238}U 和 ^{235}U 同位素经放射性衰变变成 ^{206}Pb 和 ^{207}Pb 稳定同位素,然后根据 U 和 Pb 同位素比值可以获得 3 个年龄: $^{206}Pb/^{238}U$ 、 $^{207}Pb/^{235}U$ 、 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 若矿物形成一个体系,则这 3 个年龄的误差是在一致的范围,此时同位素的年龄是谐和的,可以随意选取一个代表矿物形成时的年龄;反之,说明矿物形成以来是一个开放体系,其 U-Pb 同位素年龄是不谐和的,需要进行校正得出矿物形成时的年龄。当同位素体系封闭时,把得出的样品值投在 Pb/U 代表的直角坐标系中,通过图解可以得出随着年龄而变化的曲线,即谐和曲线和一致曲线(图 3)。若矿物在形成之后遭受了区域变质作用或热液等,会导致 Pb 丢失,将数据投入图解中,会拟合出另一条直线称为不一致曲线(图 3),此时谐和曲线和一致曲线会出现两个交点。上交点通常表示矿物形成时的年龄,对于变质岩来说不同的类型具有不同的地质年龄。原生岩浆结晶时的年龄为正变质岩年龄;沉积物源区的年龄为复变质岩年龄。下交点年龄表示矿物形成时后期所经历地质事件发生的时间[11]。

4. U-Pb 同位素定年方法

波尔特伍德在 1907 年利用矿物中 U、Pb 含量,第一次计算出同位素的年龄并创立了 U-Pb (粗铅)法。之后,尼尔在 1935 年对质谱仪进行改进,使得同位素地质年代学进入了一个新的阶段,尼尔利用已改进的质谱仪对 U、Pb 同位素组成进行分析,提出了同位素 U-Pb 法。目前国内外经常使用的 U-Pb 同位素测年方法有以下 4 个。

4.1. 同位素稀释热电离质谱法(ID-TIMS)

此方法被称为矿物 U-Pb 同位素年龄测定的“标准方法”,是将待测矿物在一定的条件下溶解,在将 U、Pb 从样品中分离出来,利用热电离质谱仪进行测定[13]。这种方法精准度高,所测的年龄范围广,测

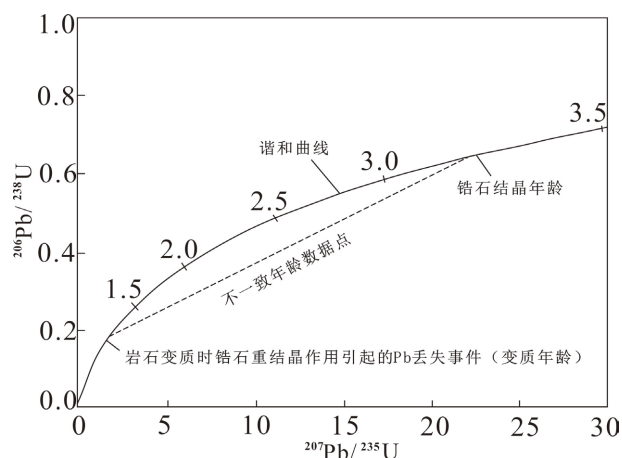


Figure 3. Schematic diagram of zircon U-Pb harmonic curve and inconsistent curve age (according to literature [9])

图 3. 锆石 U-Pb 谐和曲线及不一致曲线年龄示意图(据文献 [9])

定时所需要的样品量少，对于结构简单或在锆石形成后期未经地质作用影响的锆石进行定年，其定年数据会精确，但对于成因复杂的锆石，难以给出精准的数据。而且此方法对于实验室要求以及成本都较高，且无法进行微区原位测定。

4.2. 二次离子探针质谱法(SIMS)

该方法是在原位微区分析中最常用的方法，分析技术也最精确，可以对复杂的锆石进行不同部位的分析，其原理是通过高能一次离子轰击样品靶产生的二次离子，对样品的同位素组成进行分析[14]。目前该方法对锆石原位微区定年分析最精确，尤其是矿物较小或存在新锆石内部的细小残余锆石进行定年时，此外测试时对于样品破坏较小，但测试成本高，测试时间较长、缺乏标准样品等缺点会限制其发展。

4.3. 激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法(LA-ICP-MS)

近年来此技术已进行广泛应用，其原理是用激光束对所测矿物选定的微区进行烧蚀，被烧蚀出来的物质在 Ar 等离子体中发生电离后，对被电离的物质进行同位素比值的测定[15]。该方法目前是微区原位测年最方便、速度最快的分析方法，标样限制也不需要很严格。如果锆石样品量多且颗粒完好可以进行此技术定年，但缺点是对样品的破坏性较大，无法进行检验。若锆石样品小，内部裂隙发育、普通铅含量高，所获得的年龄通常不理想。

4.4. 激光剥蚀多接受等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)

LA-MC-ICP-MS 与 LA-ICP-MS 一样为激光剥蚀，同时也具有测试速度快，样品制备要求低等优点，但同样对测试样品的破坏性大。

5. U-Pb 同位素定年意义

近年来，许多学者利用锆石 U-Pb 同位素定年的方法，测的国内外各种类型的岩石和矿床的地质年代。对于单一结构，成因简单的岩浆锆石，可以得出正确的年龄信息。在沉积岩中，由于碎屑锆石抗风化能力强，因此可以通过测定沉积岩中的碎屑锆石的 U-Pb 年龄来分析沉积岩的物质来源，以及探讨源区的物源信息和地质演化信息[16] [17]。例如马铭株[17]对华北克拉通北部白云鄂博群和腮林忽洞群碎屑锆石的内部结构的分析和 SHRIMP U-Pb 定年测定，得出两者源区既有新太古代晚期的物质也有古元古代晚期的

物质, 从部分遭受变质的锆石推测出两者的沉积物部分来自于高级变质物源区, 反映出两者的变质基底与华北克拉通早寒武纪相似。邹思远[18]对塔里木柯坪地区二叠系的碎屑锆石进行 U-Pb 同位素定年分析, 主要得出四个年龄分别为: ① 1.7 Ga 以前; ② 0.9~1.0 Ga; ③ 750~850 Ma; ④ 420 Ma。据研究在 1.8~2.0 Ga 发生哥伦比亚超大陆聚合, 0.9~1.0 Ga 为罗迪尼亚超大陆聚合, 750~850 Ma 可能为罗迪尼亚超大陆的裂解。因此, 利用测出的几组锆石年龄, 可以很好的反映出塔里木板块的演化史。

热液矿床中, 由于热液流体对锆石进行侵蚀时, 流体会沿着锆石外部边缘和内部裂隙对锆石进行交代, 使得 U-Pb 部分体系被破坏, 因此内部结构较复杂。如果对这些锆石进行 U-Pb 微区定年, 可以得到被热液侵蚀后锆石的年龄, 反之, 对于没有受到热液影响的锆石, 年龄仍为原岩的年龄[5] [19]。据前人研究热液锆石的形成与其他世代生成的矿物在时间上有所差异, 因此对成矿时代可提供一定的依据。例如, 张小文[20]对海南抱伦金矿内的尖峰岭岩体锆石进行 U-Pb 同位素测定, 结果表明, 矿区内尖峰岭岩体中的锆石为岩浆锆石和热液锆石, 其中岩浆锆石加权平均值的年龄为 240 ± 2.1 Ma, 代表矿区内岩体的年龄, 而热液锆石加权平均值的年龄为 ± 4.3 Ma, 说明在该地区 112.8 Ma 前后出现过一次热液活动, 故抱伦金矿的形成很大程度上与此次热液作用有关, 说明热液活动的时间制约了矿床的成矿时间。

许多变质成因的锆石, 往在形成时经历许多地质事件, 故测年时会出现多个年龄。因此对于复杂成因的锆石, 要结合锆石同位素年龄以及区域地质活动, 判断出该区的地质事件, 使得锆石年龄得到合理的解释。据徐步台[21]对浙江陈蔡群的碎屑锆石进行同位素定年, 得出不和谐年龄, 与和谐曲线上下两个交点年龄分别为 1438^{+150}_{-122} Ma 和 578^{+55}_{-72} Ma。结合陈蔡群内变质岩中的矿物测得的年龄为 892 Ma, 推测陈蔡群的原岩在 900 Ma 之前形成; 陈蔡群附近地段的变质作用为 641~720 Ma, 该区 578 Ma 为锆石丢失铅的年龄, 因此在 700 Ma 左右陈蔡群经历了一次较强烈的地质事件。

6. 结论

1) 由于形成环境不同, 锆石的性质也不同, 因此不能通过某一单独的特征进行成因判断, 而是要将内部特征、包裹体特征以及微量元素的含量总体进行分析。

2) 4 种 U-Pb 同位素定年测试方法各有不同特点和适用性, 要根据锆石的实际样品进行选择。目前, LA-ICP-MS 是使用最广泛的方法。

3) 锆石 U-Pb 同位素测年方法是地质研究中一项重要方法, 必要时对其地球化学特征结合该区域地质背景, 可确定岩石岩体年龄及重要的地质演化历史。

参考文献

- [1] Ellison, A.J.G. and Navrotsky, A. (1992) Enthalpy of Formation of Zircon. *Journal of the American Ceramic Society*, **75**, 1430-1433. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1992.tb04205.x>
- [2] 移根旺. 锆石成因矿物学研究[J]. 中国水运(下半月), 2008(6): 259-260.
- [3] Pupin, J.P. (1980) Zircon and Granite Petrology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **73**, 207-220. <https://doi.org/10.1007/BF00381441>
- [4] 刘政国, 王树志, 郑旭阳, 等. 冀东马兰峪地区花岗闪长岩中巨晶锆石成因分析[J]. 地质找矿论丛, 2020, 35(4): 433-440.
- [5] 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): 161-17.
- [6] 雷玮琰, 施光海, 刘迎新. 不同成因锆石的微量元素特征研究进展[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 273-284.
- [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] 赵志丹, 刘栋, 王青, 等. 锆石微量元素及其揭示的深部过程[J]. 地学前缘, 2018, 25(6): 124-135.
- [9] 高少华, 赵红格, 鱼磊, 等. 锆石 U-Pb 同位素定年的原理、方法及应用[J]. 江西科学, 2013, 31(3): 363-368+408.
- [10] 田方正. 锆石 U-Pb 同位素定年的原理、方法及应用研究[J]. 山东工业技术, 2016(13): 288.

-
- [11] 王海然, 赵红格, 乔建新, 等. 锆石 U-Pb 同位素测年原理及应用[J]. 地质与资源, 2013, 22(3): 229-232+242.
- [12] 周红英, 李惠民. U-Pb 同位素定年技术及其地质应用潜力[J]. 地质调查与研究, 2011, 34(1): 63-70.
- [13] 何雨, 杨凯, 张飞, 等. 锆石矿物成因学与 U-Pb 同位素定年研究进展[J]. 内蒙古科技与经济, 2017(10): 63-65.
- [14] 谢桂青, 胡瑞忠, 蒋国豪, 等. 锆石的成因和 U-Pb 同位素定年的某些进展[J]. 地质地球化学, 2001, 29(4): 64-70.
- [15] 郭碧莹, 赵志强, 孔华, 等. 锆石微区原位同位素和微量元素测定的新进展[J]. 地质找矿论丛, 2014, 29(3): 424-427.
- [16] 闫义, 林舸, 李自安. 利用锆石形态、成分组成及年龄分析进行沉积物源区示踪的综合研究[J]. 大地构造与成矿学, 2003(2): 184-190.
- [17] 马铭株, 章雨旭, 颜颀强, 等. 华北克拉通北缘白云鄂博群和腮林忽洞群底部碎屑锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素分析及其地质意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(10): 2973-2988.
- [18] 邹思远, 厉子龙, 任钟元, 等. 塔里木柯坪地区二叠系沉积岩碎屑锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素特征及其对塔里木块体地质演化的限定[J]. 岩石学报, 2013, 29(10): 3369-3388.
- [19] Tomaschek, F., Kennedy, A.K., Villa, I.M., *et al.* (2003) Zircons from Syros, Cyclades, Greece-Recrystallization and Mobilization of Zircon during High-Pressure Metamorphism. *Journal of Petrology*, **44**, 1977-2002. <https://doi.org/10.1093/petrology/egg067>
- [20] 张小文, 向华, 钟增球, 等. 海南尖峰岭岩体热液锆石 U-Pb 定年及微量元素研究: 对热液作用及抱伦金矿成矿时代的限定[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2009, 34(6): 921-930.
- [21] 徐步台, 刘敦一. 浙江陈蔡群变质岩系锆石不和谐 U-Pb 年龄测定[J]. 中国地质科学院地质研究所文集, 1988(2): 75-81.