

独居石矿物学特征及其在Th-U-Pb同位素定年的应用

张晟源

桂林理工大学, 广西 桂林

收稿日期: 2022年10月27日; 录用日期: 2022年11月23日; 发布日期: 2022年11月30日

摘要

独居石是U-Pb和Th-Pb同位素测年的理想选择, 因为它们在富含Th-U的同时一般Pb含量较低。本文比较和分析了火成岩、热液岩和沉积岩独居石中稀土和微量元素的内部结构、矿物成分和地球化学性质, 以确定区别不同类型独居石的标志。岩浆型独居石具有宽而直的岩浆环, 通常与磷质方解石同时存在, 重稀土含量相对丰富; 而热液型独居石可能具有与流体冲击有关的扇形环, 通常与斜长石同时存在。沉积型独居石通常在形态上不规则, 并与自生矿物有关。它们具有典型的四分组稀土分布模式, 稀土总量较高, 相对富集轻稀土(如La、Ce), 贫Y、Sc、Th、U、Sm、Gd等, Th/U比值较低。运用LA-MC-ICP-MS技术, 可以得到较好的年龄数据。

关键词

独居石矿物学特征, LA-MC-ICP-MS, U-Pb同位素测年

Mineralogical Characteristics of Monazite and Its Application to Th-U-Pb Isotope Dating

Shengyuan Zhang

Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Oct. 27th, 2022; accepted: Nov. 23rd, 2022; published: Nov. 30th, 2022

Abstract

Monazite is ideal for U-Pb and Th-Pb isotope dating because of its low initial common Pb content

when it is enriched in Th-U. In this paper, the internal structure, mineral assemblage, rare earth and trace element geochemical characteristics of magmatic, hydrothermal and sedimentary monazite are compared and analyzed to determine the distinguishing marks of different genetic types of monazite; magmatic monazite has a wide and straight magmatic annulus, often coeval with phosphorichalcite and relatively enriched in heavy rare earths, while hydrothermal monazite may have a fan-shaped annulus related to fluid action, often coeval with plagioclase thorite. Sedimentary monazite is mostly irregular in morphology and associated with authigenic minerals. They have a typical four-group rare earth distribution pattern, with high total rare earths, relatively enriched in light rare earths (e.g. La, Ce), poor in Y, Sc, Th, U, Sm, Gd, etc., and low Th/U ratio. Using LA-MC-ICP-MS technique, better age data can be obtained.

Keywords

Mineralogical Characteristics of Monazite, LA-MC-ICP-MS, U-Pb Isotopic 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

独居石[(LREE, Th)PO₄], 又称磷化镧和磷化铀, 是一种轻稀土磷酸盐矿物, 通常作为高分异花岗岩、云英岩及伟晶岩中常见的副矿物。因其富含 U、Th 且低普通 Pb, 是 U-Pb 年代学研究的理想矿物之一, 在火成岩和变质岩的研究中具有重要的地质意义。如今, 锆石的 U-Pb 同位素测年对于讨论岩石形成的年代和大地构造运动历史的时期非常重要, 但锆石的 U-Pb 同位素系统的封闭温度很高, 约为 800°C, 而独居石 U-Pb 同位素体系的封闭温度相对较低, 约为 700°C, 弥补了锆石和替代低温同位素封闭体系(<500°C) 的空白区间, 也基本不受后期地质作用影响, 且抵御放射性损伤能力也更优[1]。

独居石不仅 U 含量高, 而且富含 Th, 可以同时获得 U-Pb 和 Th-Pb 两个同位素体系的精准年龄, 因此独居石对变质作用和流体作用过程中环境条件的变化比锆石更敏感, 这使得它对一些非常年轻的地质体的年代研究更有用。在沉积岩中, 独居石也可能是在成因过程中形成的, 其结晶于沉积作用之后的埋藏-固结成岩阶段, 为测定沉积岩的成岩年代提供了可能性[2] [3] [4]。毫无疑问, 独居石在同位素测年年代学的研究中具有较为明显的优势。本次研究对于不同类型的独居石进行对比分析, 分析其不同成因类型的独居石的矿物学和岩石定年中的特征。

根据独居石不同成因表现的矿物学特征, 可将独居石划分为岩浆成因、热液成因和沉积自生成因。为此, 本文将通过对比研究不同成因类型独居石矿物学和地球化学特征, 厘定其成因矿物学标志, 并探讨其在岩石定年中的应用。

2. 独居石成因特征

2.1. 矿物学特征

作为稀土矿物, 独居石通常分为铈-独居石和镧-独居石两种类型, 其化学式分别为(Ce, La, Nb, Th)PO₄ 和(La, Ce, Nd)PO₄, 通常以前者较为常见。其他变种的 ThO₂ 含量约 4%~12%, 如若个别变种 ThO₂ 达到 30%, 且晶体中含有 Ca 和 U, 我们将其称为富铀独居石, 若晶体富含 Si, 则称之为硅独居石。独居石为二轴晶矿物, 单斜晶系, 常呈自形-他形颗粒状或短柱状晶体, 有时呈板状、叶片状。偏光显微

镜下通常为黄色、棕色或红棕色，钍含量越多折射率越高，有显著的粗糙度，较高干涉色中高的三级白，纵切面上的斜消光，二轴晶正光性。

独居石也因其独特的特征而与其他矿物区分开来：在偏振光显微镜下呈亮黄色，高突起，高干涉色，不明显的多色性，以及由于 U-Th 的放射性而产生的多色性光晕，在背散射时呈亮白色。例如，锆石比独居石更突出，溶解度不高，是一种轴向晶体矿物[5] [6]。独居石从成因矿物学的角度可分为三类：岩浆成因，热液成因和沉积成因(表 1)。

Table 1. Monazite production, mineral assemblage and genetic type [8]

表 1. 独居石产状、矿物组合及成因类型[8]

样品号	产地	产状	成因特征	资料来源
MZ	内蒙古景峰	产于钾长花岗岩	岩浆成因	万渝生等, 2004 [17]
KX-1B-1	河北康保	产于二长花岗岩	岩浆成因	王鑫琳等, 2007 [18]
H-1	广西姑婆山	产于黑云母花岗岩	岩浆成因	洪文兴等, 1999 [12]
J485-6	山东乳山金矿	产于钾化花岗岩	岩浆成因	孙国曦等, 2002 [6]
J485-3	山东乳山金矿	产于含金石英脉	热液成因	孙国曦等, 2002 [6]
D-1-1	湖南	产于沉积岩中	沉积成因	洪文兴等, 1999 [12]

2.1.1. 岩浆成因特征

岩浆成因独居石主要赋存于中酸性岩中，如花岗岩、花岗岩伟晶岩或碱性伟晶岩，通常与磷钙锆石、褐榴石和锆石等矿物共生，在伟晶岩中可能会形成晶型完整且晶粒较大的晶体。它们通常是淡黄色、棕褐色、透明或不透明的，具有柱状、近等长或不清晰的单斜晶形态，晶粒大小为 100~200 μm 之间，呈自形 - 他形且极少含有包裹体。其典型特征是以粒间矿物存在或作为包裹体存在于石英、长石和黑云母内，与母岩之间没有明显的定向关系[7] [8]。岩浆成因的独居石在单偏光为淡黄绿色，而在阴极射线则显示为紫红色，发光微弱且分布不均，在断裂附近具有较强的发光性。由于独居石的背散射图像比阴极发光图像更亮，晶体的形态特征一般由背向散射图像来观察。BSE 图像中的岩浆独居石常见的内部结构包括振荡环带、扇形分区和均质结构，振荡环带可表现为同心振荡环带和板状振荡环带[4] [10]。凤永刚[9]测量了花岗岩中的独居石，其核心部分最暗，亮度从内到外依次增加，且晶粒的年龄随着环带向外也逐渐变小，显示出独居石的环带特征。这种内部结构反映了独居石在一次岩浆结晶过程中熔体成分的变化，单个振荡环带之间的差异反映了 Th 含量的变化[22]。环带的宽度可能受到独居石结晶过程中温度的影响，微量元素在高温下迅速扩散，形成较宽的晶环，随着温度逐渐降低，微量元素开始缓慢扩散，最终形成较窄的环带。

2.1.2. 热液成因特征

热液独居石呈为灰褐色，细粒状，大多为自形 - 半自形，通常颗粒直径 < 50 μm ，表面具有溶蚀现象，石英、云母和绿泥石等常作为其包体存在。它与岩浆成因独居石的不同之处在于，岩浆成因独居石往往呈分散状，而热液独居石则以多个小颗粒的不规则聚集体形式在小范围内呈典型的放射状、团簇状分布。另一种沿着裂隙分布或在热液中结晶的热液独居石，晶粒较大，甚至可达毫米级别，通常与热液型硫化物或氧化物矿物交互共生，形成氧化物或硫化物边缘。热液独居石多以包裹体的形式产于次生交代席状硅酸盐矿物、长石和石英之中，通常作为鉴别热液独居石的一个显著特征。强山峰[11]通过研究小秦岭地区的热液独居石，发现独居石与主成矿期有关的石英、黄铁矿、蚀变绢云母呈共结边结构(图

1), 其表面发育微裂隙, 晶体遭受溶蚀, 具有溶蚀港湾结构(图 1), 独居石晶体中还包裹有石英、黄铁矿等矿物包裹体。上述特征表明, 独居石的结晶年龄与主要成矿阶段的年龄没有明显差异, 以此认为独居石的 U-Th-Pb 年龄可能代表青南金矿的主要成矿年龄。对电子探针图像的分析表明, 在热液型独居石中, 矿石中常出现细粒、蠕虫、团粒状或具有倾斜结构的嵌入矿体或侵入矿石的细脉中。在 BSE 图像中, 热液独居石的边部常发生后期蚀变, 出现晶棱圆化、港湾状结构等交代残余结构特征; 内部出现则不规则分带、弱分带或者相互截切的环带, 以及尚未被充填的裂隙[10] [11] [12] [13]。热液型独居石主要出现在火成岩和白云岩中, 通常与斜长石、赤铁矿、磁铁矿和萤石共生。

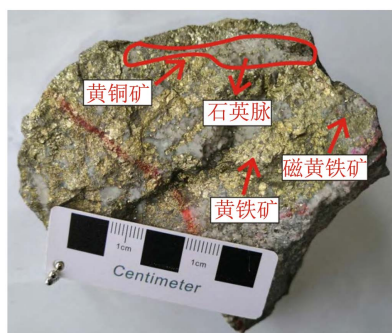


Figure 1. Hydrothermal monazite samples [12]
图 1. 热液型独居石样品[12]

2.1.3. 沉积成因特征

沉积型独居石是不规则的, 半自形 - 他形, 可呈现出“鱼形”、“鸟形”和“虫形”等各种形状, 会出现晶棱圆化、港湾状结构等特征[12]。常呈散点状(1~5 μm)、单针状(20 μm)、连晶状(30 μm)、晶簇状(20~60 μm)、聚片晶状和其他不规则状等分布, 颗粒大小约 1~60 μm , 大型独居石标本可能包含在生长过程中包裹的石英残留物组成的包裹体[13]-[18]。在北京昌平地区串岭沟组的沉积岩中, 独居石有两种分布形式: 一种是细粒或团块形式沿赤铁矿脉产出; 另一种是以他形粒状结构包裹被石英矿脉包围。

宋天锐[16]通过电子探针和能谱分析发现, 泥岩中自生独居石呈现细小的散点状、单针状、连晶状以及晶簇状, 与岩浆成因和热液成因独居石的晶型完全不同。不仅如此, 即使是在同一晶簇或连晶中, 其稀土元素和含量也不均匀, 这就说明沉积形成的独居石受到深成岩作用和后期构造运动压力的影响。另外, 宋天锐认为沉积岩中若有沉积成因的独居石存在, 则该沉积岩的 Ce 含量必定高, 富含稀土元素且含有沉积成因独居石的泥质岩, 也是近陆源区沉积的指示物。沉积成因的独居石形成于强烈氧化的环境中, 在氧化环境下, K^+ 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Si^{4+} 、 Ce^{4+} 、 La^{4+} 、 Nd^{4+} 、 Th^{4+} 等离子向海洋方向迁移, 来自海洋的 P^{5+} 和藻类分解的 H_2S 集中在泻湖, 有助于粘土矿物、黄铁矿、赤铁矿和独居石产生(图 2)。

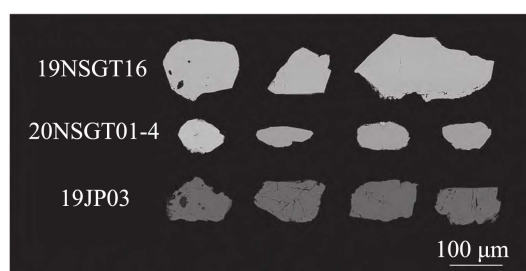


Figure 2. Backscatter images of different types of monazite
图 2. 不同类型独居石背散射图像

2.2. 地球化学特征

独居石是一种轻稀土元素的矿物,可在沉积岩、变质岩以及过铝质火成岩中出现。独居石中的 REE、Nd、Ta、Zr、Hf、U、Th、Pb 等元素常以微量组分的形式出现,Pr³⁺、Sm³⁺、Nd³⁺、Er³⁺和 Ho³⁺经常替代晶体中的阳离子。这是由于 Nd、Ta、U、Th 和 Y 等离子的大半径、高价态。这些离子在许多硅酸盐成岩矿物中并不存在,往往在残余熔体中富集,而独居石独特的晶体结构在很大程度上可以容纳过量的稀土元素,使独居石成为岩石中 U、Th 和 REE 的主要寄主矿物。

2.2.1. 微量元素

独居石中含有 Y、Sc、Th、U 等微量元素。前人[3] [14]研究表明,由于岩浆作用过程中,可供岩浆成因的独居石发生类质同象作用的空间较大,其微量元素含量相对比较高,而热液和沉积成因独居石的类质同像置换容量比较小,化学组成没有岩浆作用中元素的复杂繁多,成分较为简单,因此,热液型和沉积型独居石的微量元素含量相对较低。

不同成因的独居石有不同的 Th、U、Y 及 Th/U 比值[9] [10] [19]: 岩浆独居石的 Y、U、Th 含量较高, Th 通常在 3%~7%以上,而热液独居石和沉积独居石的 Y、U、Th 较低, Th 通常小于 1%。岩浆独居石的 Th/U 比值由原始岩浆中的 Th、U 含量以及及岩浆中独居石的分布决定。平均地壳物质中 Th/U 比值约为 4,因此,岩浆成因独居石的 Th/U 比值较大,而热液中的 Th、U 含量会相对减少,故而热液成因独居石的 Th/U 比值较小。但是,如果岩浆中的 Th/U 比值比较低,则岩浆独居石的 Th/U 比值也会低。

此外,对比研究发现:独居石与锆石之间 Th/U 比率显示一定的相关性:岩浆独居石和锆石 Th/U 比率显示一定的正相关关系,而热液和造山运动沉积的独居石和锆石的 Th/U 比率则未见稳定的相关性。

2.2.2. 稀土元素

独居石微粒中普遍存在成分不均匀分布的特征,不同地质成因独居石的稀土分布模式有很大不同。岩岩浆型独居石颗粒中的总稀土元素丰度较低,且相对富含轻稀土元素,而热液型和沉积型独居石颗粒中的总稀土元素丰度则明显较高,且相对富含重稀土元素。前人[6] [13] [14]采用电子探针分析表征不同成因类型的独居石颗粒的微区分布,发现岩浆独居石颗粒中总稀土含量一般低于 53%,明显低于热液和沉积独居石颗粒中 53.81%~60.04%的总稀土总量;有的稀土总量接近独居石的理论值,这可能是由于岩浆独居石中的稀土元素在岩石的形成过程中被其他元素所取代。

同时,岩浆独居石 HREE 和 Ho、Tm、Lu 等特殊稀土元素,总的 Y₂O₃ 和 ThO₂ 含量,以及 Ce₂O₃ 与 Y₂O₃ 比值均较热液独居石高,而热液和沉积独居石中轻稀土和特殊稀土元素如 Eu 和 Tb 相对丰富,P₂O₅ 含量较岩浆独居石高。Zhu 等[20]采用 ICP-MS 对不同成因独居石中稀土元素测定还发现,岩浆独居石微粒中 LREE/HREE 比值(7.28~22.31)、(La/Yb)_N 比值(44.17~80.90)明显低于热液和沉积独居石微粒中 LREE/HREE 比值(17.12~63.64)、(La/Yb)_N 比值(375~5388),这可能是在岩石演化过程中,成矿流体进一步富集的结果。

3. 独居石的 U-Th-Pb 定年

独居石广泛存在于沉积岩、变质岩及中酸性火成岩中,其成因与其所处的大地构造背景和经历的构造演化过程密切相关。由于独居石对温度、压力和流体性质高度敏感,因此多被用于研究多期变质岩和高级变质岩。1991 年, Suzuki 首次运用独居石进行定年,因为独居石中普通铅的浓度相对于大量的放射性铅可以忽略不计。

目前国内外对独居石 U-Th-Pb 年龄测定的方法主要有:电子探针化学法(EPMA)、单粒子独居石同位素稀释热电离质谱法(ID-TIMS)、二次离子质谱法(SIMS)和激光相关剥离-电感耦合等离子体质谱法

(LA-ICP)。上述年龄测定方法各有优缺点，其中最为精确的是 ID-TIMS 法，其对单颗独居石分析有很高的准确性，但当独居石成分复杂或为多期次生长产物时，就只能测出其混合年龄；EPMA 法空间分辨率较高[23]，但其年龄结果精度低，无法对年轻独居石进行准确分析；SIMS 法是测量精确度最高的原位测年方法，但其成本较高且不能同时获取微量元素含量。LA-ICP-MS 法的最大优点是简单、快速和便宜，但其精度与 SIMS 法相比存在较大偏差[24]。近年来，LA-ICP-MS 法逐渐成为矿物原位 - 微区-U-Pb 年龄测定的重要手段，被广泛用于测定锆石、独居石等矿物的 U-Pb 年龄。

唐文龙等[21]对独居石 29 颗有效样品进行 U-Pb 同位素测定结果，数据均是采用 207Pb 校正法对普通铅进行扣除后的结果，独居石样品的实验条件与标样一致。对样品进行同位素测定，谐和图上可以看出，这些数据点均在谐和线上或附近，其 Pb/U 年龄加权平均值为(121.5 ± 2.7) Ma (n = 29)。从图上可以看出样品中这个样品的测定结果都有较好的精度且年龄分布属于正态分布。所以含金石英脉中热液独居石测年结果为 121.5 ± 2.7 Ma，代表了矿床形成的时代(图 3)。

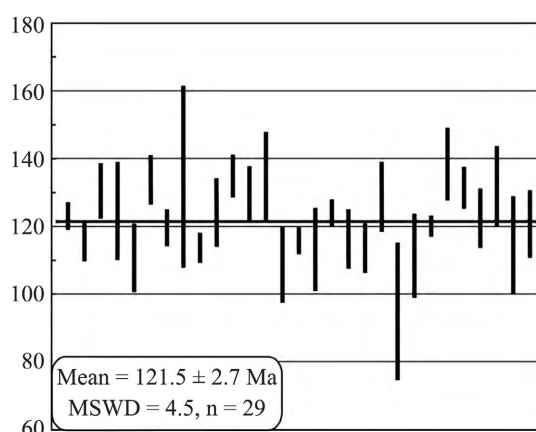


Figure 3. U-Pb harmonic curves of monazite samples [21]

图 3. 独居石样品的 U-Pb 谐和曲线图[21]

4. 结论

在不同环境中形成的独居石具有不同的晶体形态和内部结构。岩浆独居石粒径通常比热液独居石大，岩浆型独居石通常在 100~200 μm 之间，发育岩浆环带，主要以单颗粒零星分布，常充填在石英、长石、黑云母等原生矿物的缝隙之中；热液成因独居石颗粒较小，通常 <50 μm，部分发育与岩浆热液有关的扇形环带，常以集合体的形式存在，与硫化物和氧化物交互共生，并形成溶蚀边，主要作为次生石英、角闪石，次生钠长石和片状硅酸盐的包裹体；沉积成因的独居石，大小在 10~50 μm 之间，多与重晶石、白云石和自生矿物等共生。

对于不同成因的独居石，具有不同特征的微量和稀土元素。岩浆独居石微量元素(Y、Sc、Th、U 等)含量较高，Th 和 ThO₂ 含量较高，Th/U 比值较高，并与锆石 Th/U 比值具有正相关性，总稀土量较低，La、Ce 含量较低而 Sm、Gd 含量较高。热液和沉积成因独居石微量元素(Y、Sc、Th、U 等)含量较低，Th 和 ThO₂ 含量较低，Th/U 比值较低，总稀土量较高，La、Ce 含量较高而 Sm、Gd 含量较低，富集轻稀土和 Eu、Tb 等稀土元素，并具有典型的四分组效应，与锆石 Th/U 比值相比，没有稳定的相关性。

对于前人研究仅局限于某一类型的独居石的定年，对复杂成因独居石未有系统的描述。因不同成因类型的独居石具有其特征的矿物结构和稀土元素，本研究表明对复杂成因的独居石需进行显微结构、产状和矿物组合以及稀土和微量元素等方面的综合研究，才能对独居石形成的地质环境进行合理的限定，

进而对独居石的 U-Pb 年龄赋予更加合理的地质解释, 为成岩、成矿和变质事件等地质作用提供更加严格的年代学制约。

参考文献

- [1] Shen, A.J., et al. (2019) Laser Ablation *in Situ* U-Pb Dating and Its Application to Diagenesis-Porosity Evolution of Carbonate Reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, **46**, 1127-1140. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(19\)60268-5](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(19)60268-5)
- [2] 宋天锐. 大连地区前寒武纪沉积岩中发现自生独居石及其意义[J]. 沉积学报, 1999(S1): 663-667.
- [3] Evans, J. and Zalasiewicz, J. (1996) UPb, PbPb and SmNd Dating of Authigenic Monazite: Implications for the Diagenetic Evolution of the Welsh Basin. *Earth and Planetary Science Letters*, **144**, 421-433. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(96\)00177-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(96)00177-X)
- [4] Evans, J.A., Zalasiewicz, J.A., Fletcher, I., et al. (2002) Dating Diagenetic Monazite in Mudrocks: Constraining the Oil Window? *Journal of the Geological Society*, **159**, 619-622. <https://doi.org/10.1144/0016-764902-066>
- [5] 吴大清, 林传易, 王一先, 王辅亚. 独居石、磷钇矿显微阴极射线发光研究[J]. 矿物学报, 1993, 13(2): 137-141.
- [6] 孙国曦, 胡文瑄, 胡受奚, 张文兰, 张光辉, 耿仙湖. 胶北乳山金矿含金石英脉中稀土矿物的发现及其意义[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2002, 38(3): 446-456.
- [7] 黄锐华. 鉴别磷钇矿, 钍石和锆石的简易方法[J]. 矿物岩石, 1985(1): 118-120.
- [8] 邱昆峰, 杨立强, 邓军. 独居石成因分类——矿物学、岩石学和地球化学证据[C]//中国矿物岩石地球化学学会第13届学术年会论文集. 2011: 230.
- [9] 凤永刚, 刘树文, 吕勇军, 张臣, 舒桂明, 王长秋. 华北克拉通北缘隆化地区 S 型花岗岩的独居石年龄图谱[J]. 岩石学报, 2008, 24(1): 104-114.
- [10] Schandl, E.S. and Gorton, M.P. (2004) A Textural and Geochemical Guide to the Identification of Hydrothermal Monazite: Criteria for Selection of Samples for Dating Epigenetic Hydrothermal Ore Deposits. *Economic Geology*, **99**, 1027-1035. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.99.5.1027>
- [11] 强山峰, 毕诗健, 邓晓东, 郭连巧, 李建威. 豫西小秦岭地区秦南金矿床热液独居石 U-Th-Pb 定年及其地质意义[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2013, 38(1): 43-56.
- [12] 洪文兴, 何松裕, 黄舜华, 郭国璋, 侯鸿泉, 朱祥坤. 独居石中稀土元素 4 分组效应的研究及其地质意义[J]. 自然科学进展, 1999(S1): 138-141.
- [13] 洪文兴, 朱祥坤. 独居石微粒微区成分分布的研究[J]. 高校地质学报, 2000, 6(2): 167-172.
- [14] 张玉学, 朱和宝, 马富平. 某地花岗伟晶岩脉和石英碳酸盐脉中褐帘石、独居石形成条件的讨论[J]. 地球化学, 1975(3): 202-209+231-232.
- [15] 宋天锐, 和政军, 万渝生, 张巧大, 丁孝忠. 前寒武纪沉积岩中自生独居石的发现及其意义[J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 118-124.
- [16] 宋天锐, 张巧大, 万渝生. 一种含自生独居石富钾、富稀土的多硅白云母泥岩[J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 428-433.
- [17] 万渝生, 刘敦一, 简平. 独居石和锆石 SHRIMP U-Pb 定年对比[J]. 科学通报, 2004, 49(12): 1185-1190.
- [18] 王鑫琳, 张臣, 刘树文, 舒桂明. 河北康保地区花岗岩独居石电子探针定年[J]. 岩石学报, 2007, 23(4): 817-822.
- [19] 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.
- [20] Zhu, X.K. and O'Nions, R.K. (1999) Monazite Chemical Composition: Some Implications for Monazite Geochronology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **137**, 351-363. <https://doi.org/10.1007/s004100050555>
- [21] 唐文龙, 付超, 邹键, 何江涛, 席宏, 田杰鹏, 党智财. 胶东唐家沟金矿床独居石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年代学及其地质意义[J]. 地质学报, 2021, 95(3): 809-821.
- [22] 梁晓, 徐亚军, 瞿建威, 张航川, 杜远生. 独居石成因矿物学特征及其对 U-Th-Pb 年龄解释的制约[J]. 地球科学, 2022, 47(4): 1383-1398.
- [23] 张红雨, 杨立明, 苏犁, 宋述光, 王大川. LA-ICP-MS 独居石的 U(Th)-Pb 年龄精确测定方法及地质意义探究[J/OL]. 现代地质: 1-33[2022-11-25]. <https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2022.065>
- [24] 邱昆峰, 杨立强. 独居石成因特征与 U-Th-Pb 定年及三江特提斯构造演化研究例析[J]. 岩石学报, 2011, 27(9): 2721-2732.