

# 甘肃红石泉地区伟晶状白岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄与铀成矿关系

戚佳伟<sup>1</sup>, 张树明<sup>1,2</sup>, 杨春四<sup>1,3</sup>, 蓝德初<sup>1</sup>, 王利玲<sup>1</sup>

QI Jiawei<sup>1</sup>, ZHANG Shuming<sup>1,2</sup>, YANG Chunsi<sup>1,3</sup>, LAN Dechu<sup>1</sup>, WANG Liling<sup>1</sup>

1. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013;

2. 东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330013;

3. 中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640

1. *State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;*

2. *Key Laboratory of Radioactive Geology and Exploration Technology Fundamental Science for National Defense, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;*

3. *Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China*

**摘要:** 白岗岩是大陆碰撞过程中陆壳低比例熔融的产物, 与铀及多金属矿床在成因上密切关联。甘肃红石泉铀矿床含矿主岩为伟晶状白岗岩, 前人对伟晶状白岗岩的成岩年龄研究较少且精度有限, 影响了对铀矿床成因和构造背景的深入认识。对甘肃红石泉铀矿床含矿主岩——伟晶状白岗岩开展了高精度 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年, 获得伟晶状白岗岩成岩平均年龄值为 2493.5Ma, 形成时代为新太古代晚期—古元古代早期。认为伟晶状白岗岩应属于新太古代晚期—古元古代早期华北克拉通微陆块拼合作用后期的产物, 同时也是华北克拉通约 2.5Ga 岩浆构造热事件在西部地块的响应。伟晶状白岗岩与红石泉铀矿床铀成矿没有直接成因关系, 只是作为铀矿的含矿主岩。

**关键词:** 甘肃红石泉; 白岗岩; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄; 铀矿床

**中图分类号:** P588; P597+.3; P619.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2019)04-0562-11

**Qi J W, Zhang S M, Yang C S, Lan D C, Wang L L. The LA-ICP-MS zircon U-Pb age of the pegmatoidal alaskite and its relationship with uranium mineralization in Hongshiquan area, Gansu Province. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(4):562-572**

**Abstract:** Alaskite is the product of low proportion melting during continental collision, which is closely related to the origin of uranium and polymetallic deposits. The pegmatoidal alaskite is the ore-bearing host rock in Hongshiquan uranium deposit. The previous research on the formation age of pegmatoidal alaskite is relatively weak and limited in accuracy, which affects the deep understanding of the genesis and tectonic background of uranium deposits. This paper focuses on high precision LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic dating for the ore-bearing host rock—pegmatoidal alaskite. The analytical result shows that the ages of the pegmatoidal alaskite are 2455~2500Ma, suggesting late Neoproterozoic—early Paleoproterozoic. It is concluded that the pegmatoidal alaskite should be the product of the late assemblage of the North China Craton microcontinent block during the late Neoproterozoic to early Paleoproterozoic. It is also a response to the Ca.2.5Ga magma tectonic thermal event in the western block of the North China

收稿日期: 2018-05-25; 修订日期: 2019-01-03

资助项目: 国家自然科学基金项目《龙首山产于花岗岩中的碱交代型铀矿床成矿机理研究》(批准号: 41172079)和《相山斑岩型铀矿床铀矿成矿深度和剥蚀程度多方法联合估算》(批准号: 41862006)

作者简介: 戚佳伟(1994-), 男, 在读硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: 495327644@qq.com

通讯作者: 张树明(1965-), 男, 教授, 从事铀矿地质和矿产普查与勘探方面的研究。E-mail: shmzhang@ecit.cn

杨春四(1989-), 男, 在读博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: yangchunsi@gig.ac.cn

Craton. As a result, there is no positive genetic relationship between the pegmatoidal alaskite and uranium mineralization, with only pegmatoidal alaskite being the ore-bearing host rock in Hongshiquan uranium deposit.

**Key words:** Gansu Hongshiquan: alaskite; LA-ICP-MS zircon U-Pb age; uranium deposit

甘肃红石泉铀矿床位于甘肃省山丹县境内,所在地区属于龙首山-祁连山轴-多金属成矿带。该矿床自 20 世纪 60 年代发现以来,主要由核工业北京地质研究院、核工业部西北地勘局二〇三研究所、核工业部西北地勘局二一二大队等单位进行勘探和评价。红石泉铀矿床含矿主岩为伟晶状白岗岩,是中国最典型的白岗岩型铀矿床,与纳米比亚白岗岩型铀矿床相似<sup>[1]</sup>。白岗岩属于淡色花岗岩类,淡色花岗岩是一种颜色较浅的特殊花岗岩类,是大陆碰撞过程中陆壳低比例熔融的产物<sup>[2-3]</sup>,与陆内构造关系密切<sup>[4-6]</sup>,具有重要的地质指示意义<sup>[7]</sup>。同时淡色花岗岩与铀多金属矿床、内生多金属矿床及稀有金属矿产在成因上有密切的关联,可为成矿提供物质基础<sup>[8-15]</sup>。

以往诸多学者对红石泉矿床开展了矿床地质特征、控矿因素、成矿机理、矿床蚀变特征、含矿主岩特征及地球化学特征研究,取得了一系列研究成

果<sup>[1,13-14,16-24]</sup>。但对含矿主岩——伟晶状白岗岩成岩年龄仅在 20 世纪 80 年代有少量研究<sup>[1,16]</sup>,受测试手段、当时的技术条件等限制,获得的年龄值精度有限,影响了对铀矿床成因和构造背景的深入认识。

本文在前人研究的基础上,对红石泉伟晶状白岗岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,以期得到其成岩时代,并在此基础上探讨伟晶状白岗岩成岩时的构造背景和与铀成矿之间的关系。

### 1 区域地质概况

甘肃红石泉铀矿床位于华北古陆西南边缘,阿拉善地块西南边部的龙首山拱断带西段,北侧 4km 相邻潮水盆地,南边 3km 以深大断裂与河西走廊边缘接壤(图 1),属于中国西北地区祁连-秦岭铀成矿省之祁连-龙首山轴成矿带的重要组成部分<sup>[25]</sup>。

研究区位于华北地层大区阿拉善地层区,主要地层为古元古界龙首山群、中元古界墩子沟群和下

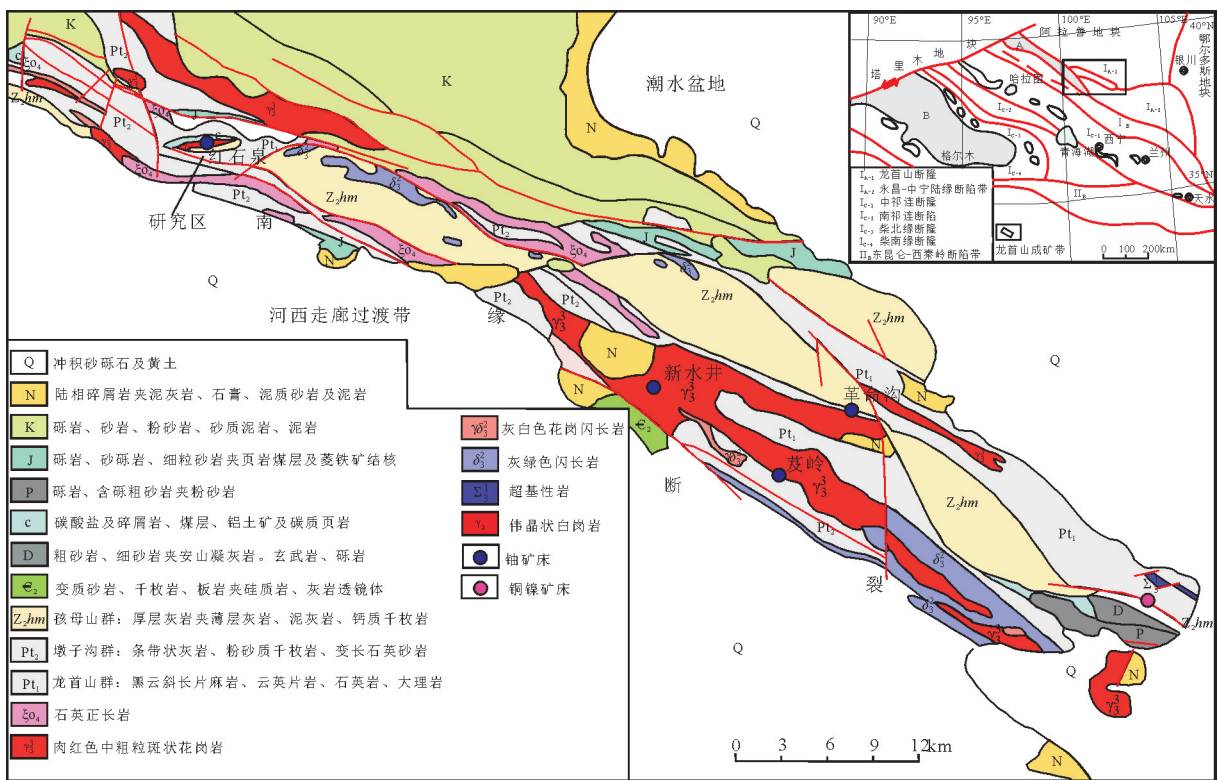


图 1 甘肃红石泉地区区域地质图  
Fig. 1 Regional geological map of Hongshiquan area, Gansu

石炭统南洼组。龙首山群为一套巨厚片岩系,主要岩性有云母石英片岩、黑云斜长片岩、斜长角闪片岩、石英岩等,岩石有不同程度的混合岩化,上部见白色厚层大理岩。墩子沟群与龙首山群呈断层接触,下部为硅质条带状白云质大理岩、结晶灰岩,上部为炭质千枚岩夹条带状灰岩。下石炭统南洼组为一套砾岩、砂岩、灰岩和页岩组成的浅海相沉积,不整合覆盖于龙首山群之上。龙首山地块具有结晶基底和沉积盖层的双层地壳结构。古元古界龙首山群为龙首山地块双层地壳结构的结晶基底;蓟县系墩子沟群、震旦系韩母山群烧火筒沟组为龙首山地块双层地壳结构的沉积盖层。主地层总体展布方向为 $290^{\circ}\sim 320^{\circ}$ ,与区域构造线方向基本一致。

研究区构造十分发育,经历了多阶段的漫长地质发展史和多期构造-岩浆活动。褶皱主要由龙首山群构成轴向为北西西向的复式背斜,断裂主要为北西西向,且沿着伟晶状白岗岩的接触面分布,次要断裂为北东向和近南北向。区内构造具有多期继承性的特点,控制了地层的展布和侵入岩的分布。

研究区岩浆活动频繁,出露的岩浆岩有元古宙石英闪长岩-斜长花岗岩、伟晶状白岗岩,加里东期中粒花岗岩、正长岩、角闪正长岩和脉岩。伟晶状白岗岩为含矿主岩。石英闪长岩-斜长花岗岩呈株

状产出,岩石为灰绿色,中粒花岗结构,主要矿物为斜长石、石英、黑云母和角闪石。

## 2 岩体地质、岩相学及地球化学特征

### 2.1 伟晶状体白岗岩地质特征

红石泉伟晶状白岗岩岩体呈东西向展布,长约3km,南北宽约200m,侵入于龙首山群和石英闪长岩-斜长花岗岩中,上覆地层为石炭系。岩体呈株状、枝状出露,近东西向侵入红石泉复向斜北翼的倒转背斜核部附近,岩体产状与围岩产状一致。厚度沿走向和倾向变化明显。岩体中含有大小不一、形态各异的变质岩残留体及捕虏体,在其接触处可见明显的同化混染带。岩体的边部多以顺层或切层穿入围岩。

### 2.2 岩相学特征

本次研究的伟晶状白岗岩样品均采自红石泉地区岩体露头良好的不同地段,样品新鲜。采样位置及描述见图2和表1。

岩石新鲜面为灰白色,局部为浅黄色(图版I-a、b)。矿物颗粒不均匀,总体呈花岗伟晶结构,块状构造。主要矿物为石英(40%)和钾长石(40%~50%),次要矿物为斜长石(10%),还有少量的黑云母和白云母。经重砂矿物鉴定,副矿物为锆石、黄铁

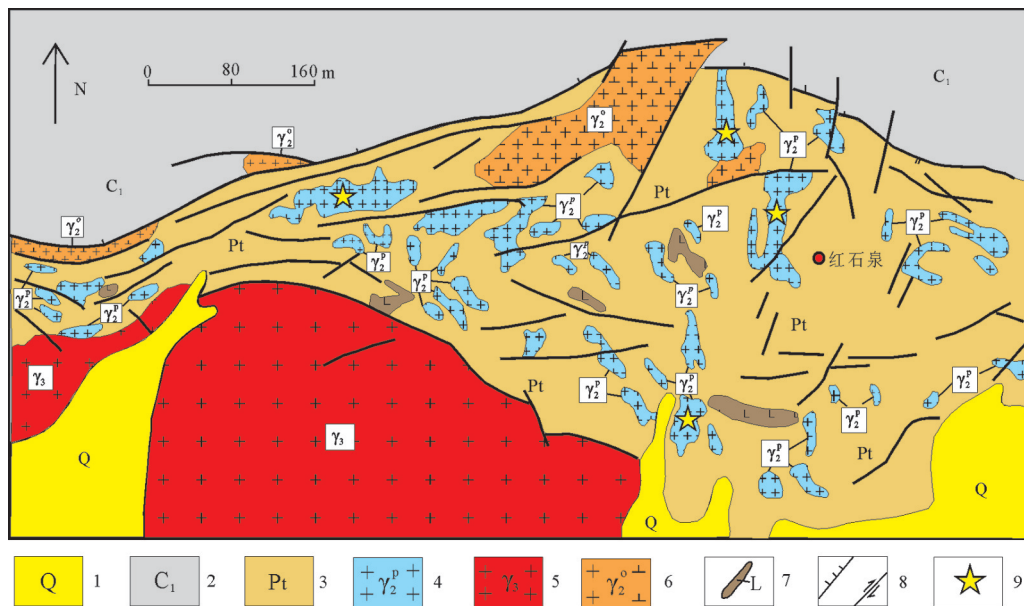


图2 伟晶状白岗岩岩体分布图

Fig. 2 Distributional characteristics of the pegmatoidal alaskite

1—第四系;2—石炭系;3—元古宇;4—伟晶状白岗岩;5—肉红色中粒斑状花岗岩;6—灰绿色斜长花岗岩-石英闪长岩;  
7—煌斑岩;8—扭转兼压性断层;9—采样位置

表 1 伟晶状白岗岩样品采集坐标及岩性概述

Table 1 Sampling position and lithology of pegmatoidal alaskite

| 样品编号     | 采样地点 | 北纬           | 东经            | 高程/m | 岩性描述   |
|----------|------|--------------|---------------|------|--------|
| LSS14-07 | 红石泉  | 38°48'56.33" | 101°15'10.87" | 2377 | 伟晶状白岗岩 |
| LSS14-23 | 红石泉  | 38°48'50.54" | 101°15'09.37" | 2423 | 伟晶状白岗岩 |
| LSS14-55 | 红石泉  | 38°48'32.53" | 101°15'31.42" | 2348 | 伟晶状白岗岩 |
| LSS14-58 | 红石泉  | 38°48'33.47" | 101°14'53.24" | 2416 | 伟晶状白岗岩 |

矿、辉钼矿、磷灰石、白钛石等。石英呈他形粒状, 粒径为 0.3~1.2cm(图版 I-c), 另见大量后期转变而来以细粒形式聚集的石英颗粒, 该部分石英颗粒整体粒度细小, 粒径为 0.20~0.35mm, 多以细粒形式聚集在一起(图版 I-d)。钾长石主要为微斜长石, 次为条纹长石。微斜长石呈半自形或他形, 纤细的格子双晶发育, 粒径为 1.0~2.0cm(图版 I-e)。斜长石呈他形板状, 均以细粒的形式展布, 粒径为 0.3~1.0mm, 常充填于石英颗粒的接触部位, 钠长双晶发育, 有轻微的绢云母化(图版 I-c)。白云母主要呈片状集合体, 分布不均匀, 偶尔出现在石英、长石的间隙中。黑云母呈半自形鳞片状, 粒径为 0.15~0.30mm, 整体发育强烈绿泥石化, 边部转变为叶绿泥石(图版 I-f)。

### 2.3 岩体地球化学特征

项目组已经对红石泉伟晶状白岗岩开展了较精细的地球化学研究工作<sup>[13-14]</sup>, 结合前人的研究成

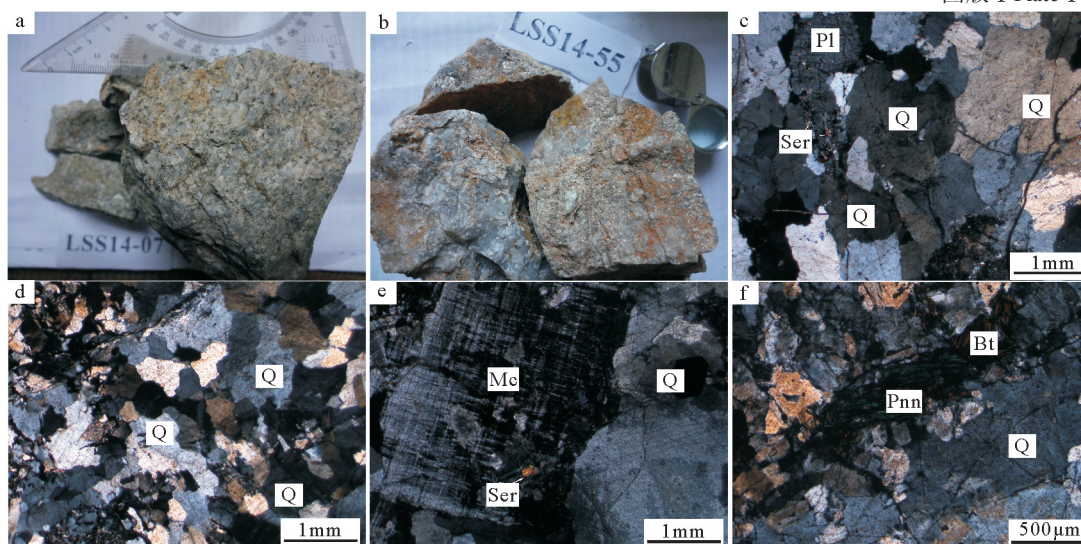
果<sup>[1,16]</sup>, 总结如下。

(1) 主量元素方面, SiO<sub>2</sub> 含量高(66.56%~79.44%), K<sub>2</sub>O 含量较高(4.10%~7.86%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较低(0.07%~3.17%), CaO、MgO 含量较低且变化范围大, 分别为 0.14%~2.03%和 0.01%~1.73%。红石泉伟晶状白岗岩的铝饱和指数 A/CNK 为 0.90~1.19, 表现出弱过铝质特征。碱含量较高, 样品 ALK 为 7.46%~10.36%; 里特曼指数( $\sigma$ ) 在 1.73~4.17 之间, 属于钙碱性系列; 碱度率指数(A.R.) 变化于 3.46~5.88 之间。

(2) 微量元素方面, 相对富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素, La、Ce、Nd 等稀土元素, 以及 Zr、Hf 等高场强元素, 相对亏损大离子亲石元素 Ba、Sr 和高场强元素 Nb、Ta、P、Ti, 并具有低 Sr、高 Y 的特点。

(3) 稀土元素总量中等, 轻稀土元素相对富集且分馏程度较重稀土元素明显,  $\delta$ Eu 值为 0.30~0.89, 具负 Eu 异常, 稀土元素配分形式呈略右倾型, 反映

图版 I Plate I



a. 样品 LSS14-07 伟晶状白岗岩手标本照片; b. 样品 LSS14-55 伟晶状白岗岩手标本照片; c. 斜长石充填于石英颗粒接触部位, 并见绢云母化; d. 部分粒度细小的石英颗粒; e. 微斜长石格子双晶; f. 黑云母绿泥石化。

Q—石英; Ser—绢云母; Mc—微斜长石; Bt—黑云母; Pnn—叶绿泥石; Pl—斜长石

伟晶状白岗岩经历了重熔和分异作用。

(4) Sr-Nd-Pb 同位素方面, 伟晶状白岗岩的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.743780 \sim 0.937621$ , 高于大陆地壳平均值;  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -18.9 \sim 11.3$ , 总体变化范围较大; Sm、Nd 分馏不明显, 对应的亏损地幔 Nd 的模式年龄  $T_{2\text{DM}} = 2538 \sim 2739\text{Ma}$ ;  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.810 \sim 23.226$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.622 \sim 17.800$ , 平均值为 16.334,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.523 \sim 4.096$ , Pb 校正后初始值与实验测试值偏差较大, 具有高放射性成因铅同位素特征。

### 3 伟晶状白岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

#### 3.1 样品制备和分析方法

锆石单矿物由河北省廊坊市诚信地质服务有限公司分选。北京中兴美科科技有限公司完成锆石制靶和阴极发光 (CL) 照相。在双目镜下挑选出晶形、透明度、色泽度较好且无包体、无裂隙的代表性锆石颗粒, 制作环氧树脂样品靶, 待其固结后打磨并抛光, 使锆石颗粒中心暴露出来, 接着进行反射光、透射光、CL 图像及背散射 (BSE) 图像采集。

LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析在中国地质大学 (北京) 地质过程与矿产资源国家重点实验室激光烧蚀等离子质谱 (LA-ICP-MS) 微区分析实验室完成。激光剥蚀系统为 GeoLasPro 193 准分子固体进样系统, ICP-MS 为美国 Thermo Fisher 公司生产的 X Series 2 型四极杆等离子体质谱。测试过程中, 激光束斑直径为  $32\mu\text{m}$ , 频率为 6Hz, 采用氦气为载气, 氩气为补偿气。采用美国国家标准参考物质 NIST SRM610 对仪器进行最佳化, 标准锆石 91500<sup>[26]</sup> 为定年外标样品。样品测试过程中每测定 5 个样品点, 测定 2 次标准锆石 91500, 每个样品前 20s 为背景信号采集时间, 样品信号采集时间为 50s。测试完成后, 分别用 ICPMSDataCal<sup>[27]</sup> 和 4.5 版的 Isoplot 程序<sup>[28]</sup> 对原始测试数据进行离线处理及加权平均计算和 U-Pb 谐和图绘制。

#### 3.2 分析结果

##### (1) 样品 LSS14-07

锆石颜色为浅粉色、浅玫瑰色, 次棱角柱状、次滚圆柱状。多数晶体衰变至半透明, 少数晶体透明, 内含少量气、固包体。晶体大小主要为  $50 \sim 150\mu\text{m}$ , 晶体长宽比多为 1~2, 个别可达 3。锆石 U、Th 含量分别为  $171 \times 10^{-6} \sim 841 \times 10^{-6}$  和  $61 \times 10^{-6} \sim 522 \times$

$10^{-6}$  (表 2), U 含量相对集中, Th 变化范围较大, 锆石的阴极发光强度随着锆石中的 U、Th 等微量元素含量增高而减弱, 所以图 3 中锆石的发光性弱<sup>[29-30]</sup>。Th/U 值集中分布在 0.35~1.20 之间 (表 2), 平均值为 0.61, 大于 0.4, 表明这些锆石为岩浆成因<sup>[31-32]</sup>。LSS14-07 样品共测试锆石 30 粒, 14 个有效测点在 U-Pb 谐和图中构成一条不一致线, 测点的一致性较好 (图 4), 谐和线的上交点年龄为  $2482 \pm 120\text{Ma}$  (MSWD=1.6), 代表锆石的形成年龄。

##### (2) 样品 LSS14-23

锆石颜色为浅玫瑰色, 多呈次滚圆柱状、粒状。晶体表面较光洁, 少数衰变。晶体大小主要为  $0.05 \sim 0.15\text{mm}$ , 晶体长宽比多为 1~2。根据 CL 图像可以看出, 该样品锆石晶形相对完好, 明显发育韵律环带结构和岩浆生长环带, 内部结构清晰, 裂纹较少 (图 3), 具有典型的岩浆成因特征; 锆石 U、Th 含量分别为  $45 \times 10^{-6} \sim 365 \times 10^{-6}$  和  $20 \times 10^{-6} \sim 212 \times 10^{-6}$  (表 2), 且分布相对集中。Th/U 值为 0.39~1.03 (表 2), 平均值为 0.68, 大于 0.4, 证明锆石为岩浆成因, 且基本未受后期改造作用<sup>[31-32]</sup>。LSS14-23 样品共测试锆石 30 个粒, 22 个有效测点在 U-Pb 谐和图中构成一条不一致线, 且测点的一致性较好 (图 4), 谐和线的上交点年龄为  $2527 \pm 59\text{Ma}$  (MSWD=0.49), 代表锆石的形成年龄。

##### (3) 样品 LSS14-55

锆石为黄色、粉色、玫瑰色, 呈次棱角-次滚圆柱状、粒状。多数晶体衰变至半透明。少数晶体较光洁, 透明, 内含气、固包体。晶体大小主要为  $0.05 \sim 0.15\text{mm}$ , 晶体长宽比多为 1~2。锆石颗粒较大, 晶形相对完整, 岩浆生长环带明显 (图 3), 属于岩浆成因锆石。锆石外围环带与内部相比具有不规则的特征, 且核部和边部的年龄存在一定的差值。锆石 U、Th 含量分别为  $74 \times 10^{-6} \sim 476 \times 10^{-6}$  和  $50 \times 10^{-6} \sim 286 \times 10^{-6}$  (表 2), 相对集中。Th/U 值为 0.46~1.08 (表 2), 平均值为 0.73, 均大于 0.4, 表明这些锆石具有岩浆成因的特点<sup>[31-32]</sup>, 且受后期改造作用不明显。LSS14-55 样品共测试锆石 30 粒, 24 个有效测点在 U-Pb 谐和图中构成一条不一致线, 测点的一致性较好 (图 4), 谐和线的上交点年龄为  $2486 \pm 50\text{Ma}$  (MSWD=0.55), 代表锆石的形成年龄。

##### (4) 样品 LSS14-58

锆石为粉色、黄色、灰色, 多呈次棱角-次滚圆

表 2 甘肃红石泉白岗岩样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb analytical results of the pegmatoidal alaskites in Hongshiquan area, Gansu

| 测点号         | 元素含量/ $10^{-6}$ |     |     | Th/U | 同位素比值                             |            |                                  |            |                                  |            | 年龄/Ma                             |            |                                  |            |                                  |            |
|-------------|-----------------|-----|-----|------|-----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|
|             | U               | Th  | Pb  |      | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 1 $\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1 $\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1 $\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 1 $\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1 $\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1 $\sigma$ |
| 样品 LSS14-07 |                 |     |     |      |                                   |            |                                  |            |                                  |            |                                   |            |                                  |            |                                  |            |
| 1           | 315             | 158 | 176 | 0.50 | 0.1471                            | 0.0048     | 9.1741                           | 0.3136     | 0.4504                           | 0.0066     | 2313                              | 56         | 2356                             | 31         | 2397                             | 29         |
| 4           | 230             | 125 | 136 | 0.54 | 0.1572                            | 0.0052     | 9.9786                           | 0.3402     | 0.4623                           | 0.0057     | 2426                              | 56         | 2433                             | 32         | 2450                             | 25         |
| 5           | 317             | 148 | 174 | 0.47 | 0.1544                            | 0.0057     | 9.1755                           | 0.3594     | 0.4321                           | 0.0061     | 2395                              | 63         | 2356                             | 36         | 2315                             | 27         |
| 6           | 201             | 151 | 122 | 0.75 | 0.1736                            | 0.0069     | 10.7050                          | 0.4476     | 0.4503                           | 0.0065     | 2592                              | 66         | 2498                             | 39         | 2397                             | 29         |
| 8           | 223             | 115 | 128 | 0.52 | 0.1620                            | 0.0054     | 9.9671                           | 0.3549     | 0.4478                           | 0.0054     | 2477                              | 56         | 2432                             | 33         | 2385                             | 24         |
| 9           | 372             | 198 | 206 | 0.53 | 0.1616                            | 0.0051     | 9.4967                           | 0.3074     | 0.4279                           | 0.0049     | 2473                              | 54         | 2387                             | 30         | 2296                             | 22         |
| 10          | 248             | 143 | 144 | 0.58 | 0.1618                            | 0.0049     | 9.9520                           | 0.3215     | 0.4471                           | 0.0063     | 2476                              | 46         | 2430                             | 30         | 2382                             | 28         |
| 11          | 272             | 164 | 155 | 0.60 | 0.1595                            | 0.0050     | 9.5237                           | 0.3163     | 0.4338                           | 0.0064     | 2450                              | 53         | 2390                             | 31         | 2323                             | 29         |
| 12          | 257             | 95  | 136 | 0.37 | 0.1590                            | 0.0054     | 9.3796                           | 0.3434     | 0.4272                           | 0.0063     | 2456                              | 57         | 2376                             | 34         | 2293                             | 28         |
| 13          | 256             | 89  | 142 | 0.35 | 0.1582                            | 0.0055     | 9.8583                           | 0.3631     | 0.4494                           | 0.0061     | 2436                              | 59         | 2422                             | 34         | 2393                             | 27         |
| 14          | 232             | 182 | 141 | 0.79 | 0.1636                            | 0.0053     | 10.3115                          | 0.3520     | 0.4545                           | 0.0071     | 2494                              | 54         | 2463                             | 32         | 2415                             | 31         |
| 17          | 206             | 84  | 118 | 0.41 | 0.1590                            | 0.0053     | 10.1871                          | 0.3232     | 0.4583                           | 0.0059     | 2456                              | 58         | 2452                             | 29         | 2432                             | 26         |
| 18          | 215             | 258 | 134 | 1.20 | 0.1465                            | 0.0059     | 8.9547                           | 0.3326     | 0.4371                           | 0.0067     | 2306                              | 69         | 2333                             | 34         | 2338                             | 30         |
| 19          | 232             | 87  | 124 | 0.37 | 0.1467                            | 0.0058     | 9.0204                           | 0.3375     | 0.4372                           | 0.0071     | 2309                              | 69         | 2340                             | 34         | 2338                             | 32         |
| 样品 LSS14-23 |                 |     |     |      |                                   |            |                                  |            |                                  |            |                                   |            |                                  |            |                                  |            |
| 1           | 131             | 84  | 79  | 0.65 | 0.1602                            | 0.0050     | 10.2540                          | 0.3060     | 0.4601                           | 0.0058     | 2458                              | 52         | 2458                             | 28         | 2440                             | 26         |
| 4           | 194             | 122 | 113 | 0.63 | 0.1622                            | 0.0051     | 9.9973                           | 0.3094     | 0.4416                           | 0.0056     | 2479                              | 53         | 2435                             | 29         | 2358                             | 25         |
| 5           | 82              | 65  | 51  | 0.79 | 0.1617                            | 0.0062     | 10.3459                          | 0.3725     | 0.4617                           | 0.0071     | 2474                              | 65         | 2466                             | 33         | 2447                             | 31         |
| 6           | 100             | 80  | 62  | 0.80 | 0.1640                            | 0.0070     | 10.2462                          | 0.4142     | 0.4496                           | 0.0074     | 2498                              | 72         | 2457                             | 37         | 2394                             | 33         |
| 7           | 150             | 103 | 96  | 0.69 | 0.1673                            | 0.0065     | 11.0416                          | 0.4009     | 0.4747                           | 0.0073     | 2531                              | 65         | 2527                             | 34         | 2504                             | 32         |
| 8           | 238             | 165 | 129 | 0.51 | 0.1618                            | 0.0057     | 10.5462                          | 0.3458     | 0.4680                           | 0.0067     | 2476                              | 59         | 2484                             | 30         | 2475                             | 29         |
| 10          | 237             | 93  | 144 | 0.39 | 0.1679                            | 0.0053     | 11.2245                          | 0.3354     | 0.4779                           | 0.0060     | 2537                              | 54         | 2542                             | 28         | 2518                             | 26         |
| 11          | 104             | 71  | 67  | 0.68 | 0.1666                            | 0.0061     | 11.2219                          | 0.4006     | 0.4804                           | 0.0067     | 2524                              | 61         | 2542                             | 33         | 2529                             | 29         |
| 13          | 286             | 195 | 181 | 0.68 | 0.1658                            | 0.0062     | 11.0512                          | 0.3943     | 0.4747                           | 0.0063     | 2517                              | 63         | 2527                             | 33         | 2504                             | 28         |
| 15          | 113             | 89  | 70  | 0.78 | 0.1611                            | 0.0055     | 10.3632                          | 0.3402     | 0.4619                           | 0.0084     | 2478                              | 58         | 2468                             | 30         | 2448                             | 37         |
| 17          | 111             | 85  | 67  | 0.77 | 0.1622                            | 0.0052     | 10.4251                          | 0.3403     | 0.4621                           | 0.0095     | 2479                              | 54         | 2473                             | 30         | 2449                             | 42         |
| 18          | 159             | 63  | 90  | 0.39 | 0.1590                            | 0.0051     | 10.2001                          | 0.3127     | 0.4611                           | 0.0059     | 2456                              | 54         | 2453                             | 28         | 2444                             | 26         |
| 19          | 45              | 20  | 27  | 0.45 | 0.1699                            | 0.0060     | 11.4076                          | 0.4035     | 0.4829                           | 0.0076     | 2557                              | 59         | 2557                             | 33         | 2540                             | 33         |
| 20          | 125             | 75  | 74  | 0.60 | 0.1608                            | 0.0049     | 10.3573                          | 0.3113     | 0.4617                           | 0.0052     | 2464                              | 52         | 2467                             | 28         | 2447                             | 23         |
| 21          | 173             | 86  | 103 | 0.50 | 0.1628                            | 0.0043     | 10.8760                          | 0.2803     | 0.4788                           | 0.0060     | 2485                              | 44         | 2513                             | 24         | 2522                             | 26         |
| 22          | 226             | 144 | 130 | 0.64 | 0.1552                            | 0.0043     | 9.7379                           | 0.2610     | 0.4497                           | 0.0053     | 2403                              | 47         | 2410                             | 25         | 2394                             | 23         |
| 24          | 295             | 175 | 158 | 0.60 | 0.1542                            | 0.0047     | 9.1444                           | 0.2745     | 0.4229                           | 0.0048     | 2394                              | 52         | 2353                             | 28         | 2274                             | 22         |
| 25          | 88              | 78  | 53  | 0.89 | 0.1607                            | 0.0059     | 10.0714                          | 0.3854     | 0.4453                           | 0.0068     | 2465                              | 62         | 2441                             | 35         | 2375                             | 30         |
| 27          | 126             | 89  | 79  | 0.71 | 0.1653                            | 0.0047     | 11.2156                          | 0.3273     | 0.4831                           | 0.0059     | 2510                              | 48         | 2541                             | 27         | 2541                             | 25         |
| 28          | 113             | 92  | 70  | 0.81 | 0.1582                            | 0.0043     | 10.3286                          | 0.2789     | 0.4664                           | 0.0054     | 2436                              | 45         | 2465                             | 25         | 2468                             | 24         |
| 29          | 106             | 70  | 60  | 0.66 | 0.1521                            | 0.0043     | 9.5937                           | 0.2831     | 0.4508                           | 0.0069     | 2369                              | 48         | 2397                             | 27         | 2399                             | 31         |
| 30          | 112             | 115 | 72  | 1.03 | 0.1586                            | 0.0044     | 10.3372                          | 0.2849     | 0.4663                           | 0.0059     | 2440                              | 46         | 2465                             | 26         | 2467                             | 26         |

续表2

| 测点号        | 元素含量/ $10^{-6}$ |     |     | Th/U | 同位素比值                             |            |                                  |            |                                  |            | 年龄/Ma                             |            |                                  |            |                                  |            |
|------------|-----------------|-----|-----|------|-----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|
|            | U               | Th  | Pb  |      | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 1 $\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1 $\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1 $\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 1 $\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1 $\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1 $\sigma$ |
| 样品LSS14-55 |                 |     |     |      |                                   |            |                                  |            |                                  |            |                                   |            |                                  |            |                                  |            |
| 1          | 180             | 107 | 102 | 0.59 | 0.1602                            | 0.0050     | 10.2540                          | 0.3060     | 0.4601                           | 0.0058     | 2324                              | 48         | 2326                             | 26         | 2325                             | 26         |
| 2          | 217             | 166 | 136 | 0.77 | 0.1694                            | 0.0052     | 9.4338                           | 0.2797     | 0.4001                           | 0.0049     | 2462                              | 41         | 2467                             | 24         | 2467                             | 24         |
| 3          | 145             | 114 | 90  | 0.78 | 0.15570                           | 0.0047     | 7.8022                           | 0.2317     | 0.3593                           | 0.0048     | 2417                              | 43         | 2418                             | 24         | 2418                             | 23         |
| 4          | 360             | 171 | 192 | 0.47 | 0.1622                            | 0.0051     | 9.9973                           | 0.3094     | 0.4416                           | 0.0056     | 2336                              | 43         | 2306                             | 26         | 2262                             | 23         |
| 5          | 101             | 67  | 62  | 0.66 | 0.1617                            | 0.0062     | 10.3459                          | 0.3725     | 0.4617                           | 0.0071     | 2473                              | 48         | 2484                             | 28         | 2498                             | 34         |
| 6          | 126             | 98  | 77  | 0.78 | 0.1640                            | 0.0070     | 10.2462                          | 0.4142     | 0.4496                           | 0.0074     | 2426                              | 52         | 2433                             | 30         | 2437                             | 29         |
| 7          | 190             | 115 | 107 | 0.61 | 0.1673                            | 0.0065     | 11.0416                          | 0.4009     | 0.4747                           | 0.0073     | 2418                              | 52         | 2379                             | 29         | 2329                             | 27         |
| 8          | 282             | 286 | 166 | 1.02 | 0.1618                            | 0.0057     | 10.5462                          | 0.3458     | 0.4680                           | 0.0067     | 2413                              | 43         | 2362                             | 25         | 2294                             | 25         |
| 9          | 135             | 116 | 83  | 0.86 | 0.1618                            | 0.0055     | 9.0777                           | 0.2915     | 0.4018                           | 0.0056     | 2427                              | 47         | 2434                             | 27         | 2433                             | 30         |
| 10         | 90              | 51  | 53  | 0.56 | 0.1679                            | 0.0053     | 11.2245                          | 0.3354     | 0.4779                           | 0.0060     | 2472                              | 50         | 2475                             | 27         | 2477                             | 27         |
| 11         | 154             | 152 | 100 | 0.99 | 0.1666                            | 0.0061     | 11.2219                          | 0.4006     | 0.4804                           | 0.0067     | 2473                              | 43         | 2485                             | 24         | 2487                             | 24         |
| 13         | 162             | 131 | 97  | 0.81 | 0.1658                            | 0.0062     | 11.0512                          | 0.3943     | 0.4747                           | 0.0063     | 2405                              | 47         | 2415                             | 26         | 2413                             | 29         |
| 14         | 140             | 93  | 83  | 0.67 | 0.1611                            | 0.0057     | 9.3743                           | 0.3171     | 0.4157                           | 0.0060     | 2428                              | 43         | 2446                             | 25         | 2444                             | 26         |
| 15         | 183             | 122 | 110 | 0.67 | 0.1611                            | 0.0055     | 10.3632                          | 0.3402     | 0.4619                           | 0.0084     | 2442                              | 45         | 2465                             | 23         | 2466                             | 21         |
| 17         | 160             | 112 | 95  | 0.70 | 0.1622                            | 0.0052     | 10.4251                          | 0.3403     | 0.4621                           | 0.0095     | 2389                              | 52         | 2417                             | 27         | 2416                             | 25         |
| 19         | 105             | 90  | 64  | 0.86 | 0.1700                            | 0.0060     | 11.4076                          | 0.4035     | 0.4829                           | 0.0076     | 2409                              | 59         | 2438                             | 31         | 2440                             | 33         |
| 20         | 99              | 89  | 64  | 0.90 | 0.1608                            | 0.0049     | 10.35730                         | 0.3113     | 0.4617                           | 0.0052     | 2453                              | 54         | 2483                             | 29         | 2484                             | 26         |
| 22         | 104             | 85  | 67  | 0.82 | 0.1552                            | 0.0043     | 9.7379                           | 0.2610     | 0.4497                           | 0.0053     | 2503                              | 46         | 2528                             | 26         | 2527                             | 26         |
| 23         | 75              | 65  | 48  | 0.87 | 0.1610                            | 0.0046     | 11.3366                          | 0.3121     | 0.5032                           | 0.0055     | 2498                              | 54         | 2520                             | 31         | 2520                             | 29         |
| 24         | 80              | 50  | 49  | 0.63 | 0.1542                            | 0.0047     | 9.1444                           | 0.2745     | 0.4229                           | 0.0048     | 2540                              | 56         | 2555                             | 32         | 2553                             | 32         |
| 25         | 139             | 63  | 77  | 0.46 | 0.1607                            | 0.0059     | 10.0714                          | 0.3854     | 0.4453                           | 0.0068     | 2439                              | 55         | 2425                             | 30         | 2389                             | 28         |
| 27         | 329             | 176 | 197 | 0.53 | 0.1653                            | 0.0047     | 11.2156                          | 0.3273     | 0.4831                           | 0.0059     | 2469                              | 44         | 2499                             | 25         | 2498                             | 25         |
| 28         | 135             | 145 | 86  | 1.08 | 0.1582                            | 0.0043     | 10.3286                          | 0.2789     | 0.4664                           | 0.0054     | 2503                              | 52         | 2461                             | 29         | 2373                             | 30         |
| 30         | 153             | 134 | 98  | 0.88 | 0.1586                            | 0.0044     | 10.3372                          | 0.2849     | 0.4663                           | 0.0059     | 2476                              | 48         | 2504                             | 26         | 2497                             | 30         |
| 样品LSS14-58 |                 |     |     |      |                                   |            |                                  |            |                                  |            |                                   |            |                                  |            |                                  |            |
| 2          | 250             | 85  | 131 | 0.34 | 0.1481                            | 0.0039     | 8.9599                           | 0.2418     | 0.4293                           | 0.0051     | 2324                              | 45         | 2334                             | 25         | 2303                             | 23         |
| 3          | 214             | 108 | 117 | 0.51 | 0.1482                            | 0.0039     | 8.9797                           | 0.2302     | 0.4308                           | 0.0051     | 2326                              | 45         | 2336                             | 23         | 2309                             | 23         |
| 4          | 172             | 86  | 99  | 0.50 | 0.1530                            | 0.0043     | 9.7493                           | 0.2658     | 0.4540                           | 0.0055     | 2380                              | 48         | 2411                             | 25         | 2413                             | 25         |
| 6          | 296             | 128 | 166 | 0.43 | 0.1510                            | 0.0049     | 9.5157                           | 0.3087     | 0.4483                           | 0.0074     | 2358                              | 56         | 2389                             | 30         | 2387                             | 33         |
| 7          | 151             | 72  | 84  | 0.48 | 0.1499                            | 0.0049     | 9.3493                           | 0.2966     | 0.4449                           | 0.0058     | 2344                              | 56         | 2373                             | 29         | 2373                             | 26         |
| 10         | 227             | 107 | 119 | 0.47 | 0.1535                            | 0.0042     | 9.1748                           | 0.2601     | 0.4274                           | 0.0055     | 2385                              | 46         | 2356                             | 26         | 2294                             | 25         |
| 11         | 162             | 69  | 82  | 0.42 | 0.1536                            | 0.0048     | 8.9415                           | 0.2832     | 0.4183                           | 0.0057     | 2387                              | 54         | 2332                             | 29         | 2253                             | 26         |
| 12         | 92              | 44  | 50  | 0.48 | 0.1566                            | 0.0058     | 9.7653                           | 0.3642     | 0.4498                           | 0.0070     | 2420                              | 63         | 2413                             | 34         | 2394                             | 31         |
| 13         | 169             | 68  | 90  | 0.41 | 0.1534                            | 0.0051     | 9.7688                           | 0.3491     | 0.4566                           | 0.0065     | 2384                              | 56         | 2413                             | 33         | 2424                             | 29         |
| 14         | 157             | 78  | 87  | 0.50 | 0.1575                            | 0.0048     | 10.1035                          | 0.3120     | 0.4617                           | 0.0053     | 2429                              | 52         | 2444                             | 29         | 2447                             | 24         |
| 17         | 185             | 159 | 113 | 0.86 | 0.1655                            | 0.0053     | 10.5853                          | 0.3398     | 0.4608                           | 0.0065     | 2513                              | 54         | 2487                             | 30         | 2443                             | 28         |
| 19         | 100             | 53  | 50  | 0.52 | 0.1476                            | 0.0055     | 8.5137                           | 0.3196     | 0.4162                           | 0.0062     | 2318                              | 64         | 2287                             | 34         | 2243                             | 28         |
| 20         | 192             | 90  | 101 | 0.47 | 0.1578                            | 0.0049     | 9.9376                           | 0.3229     | 0.4528                           | 0.0063     | 2432                              | 47         | 2429                             | 30         | 2408                             | 28         |
| 21         | 126             | 73  | 67  | 0.58 | 0.1612                            | 0.0054     | 9.9123                           | 0.3221     | 0.4439                           | 0.0064     | 2468                              | 57         | 2427                             | 30         | 2368                             | 29         |
| 25         | 229             | 103 | 118 | 0.45 | 0.1515                            | 0.0068     | 9.2969                           | 0.3944     | 0.4396                           | 0.0073     | 2365                              | 76         | 2368                             | 39         | 2349                             | 33         |
| 26         | 214             | 275 | 142 | 1.29 | 0.1670                            | 0.0068     | 11.1363                          | 0.4298     | 0.4783                           | 0.0073     | 2527                              | 68         | 2535                             | 36         | 2520                             | 32         |
| 27         | 167             | 56  | 84  | 0.34 | 0.1577                            | 0.0057     | 9.5756                           | 0.3447     | 0.4347                           | 0.0064     | 2431                              | 62         | 2395                             | 33         | 2327                             | 29         |
| 29         | 223             | 155 | 134 | 0.70 | 0.1608                            | 0.0050     | 10.5302                          | 0.3245     | 0.4699                           | 0.0064     | 2465                              | 53         | 2483                             | 29         | 2483                             | 28         |

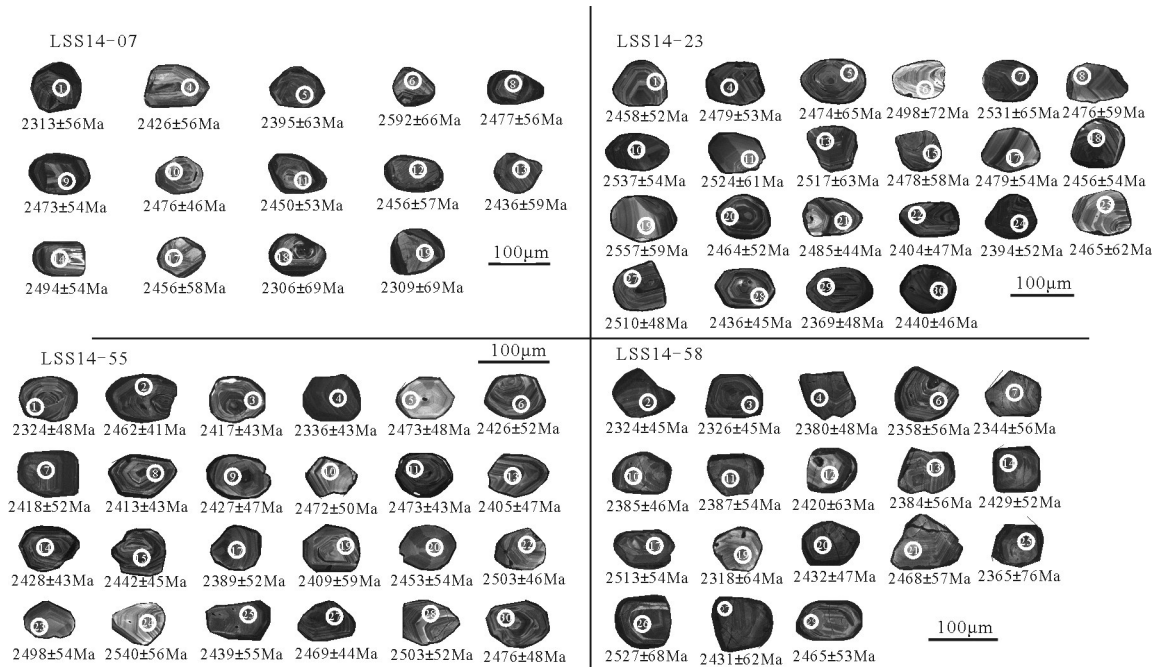


图3 红石泉伟晶状白岗岩锆石阴极发光图像

Fig. 3 Cathodoluminescent images of the pegmatoidal alaskite in Hongshiquan area

柱状,晶体严重衰变,半透明,成为水化锆石。晶体大小主要为0.05~0.15mm,晶体长宽比多为1.5~2,个别高达3。锆石具清晰的环带结构(图3),显示明显的岩浆锆石特征,属于岩浆成因锆石。锆石U、Th含量分别为 $92 \times 10^{-6} \sim 562 \times 10^{-6}$ 和 $33 \times 10^{-6} \sim 428 \times 10^{-6}$ (表2),含量相对稳定,变化范围小,表明样品中U和Th分馏不明显。Th/U值多集中在0.30~0.93之间(表2),平均值为0.54,具有典型的岩浆锆石特征<sup>[31-32]</sup>。LSS14-58样品共测试锆石30粒,18个有效测点在U-Pb谐和图中构成一条不一致线,且测点一致性较好(图4-d),谐和线的上交点年龄为 $2479 \pm 84$ Ma,MSWD=0.60,代表锆石的形成年龄。

## 4 讨论

### 4.1 伟晶状白岗岩的成岩年龄

前人对红石泉伟晶状白岗岩成岩年龄的研究主要集中于20世纪80年代,采用的方法各异,获得的年龄值也相差较大。王木清等<sup>[1]</sup>用K-Ar法测得的伟晶状白岗岩白云母年龄为1296~1690Ma,用全岩Rb-Sr等时线法测得的年龄为 $1206 \pm 133$ Ma;戎嘉树等<sup>[16]</sup>同样采用K-Ar法对白云母样品进行了测定,获得的年龄为1697~1750Ma,采用U-Th-Pb法对2个伟晶状白岗岩中的锆石进行测年,结果表明

内部年龄不一致,取 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄1745Ma和1959Ma两个年龄值;张诚等<sup>[18]</sup>获得的伟晶状白岗岩Rb-Sr同位素年龄为1774Ma。中国铀矿研究评价项目组<sup>①</sup>据此认为,红石泉铀矿床伟晶状白岗岩形成于1750Ma左右,是中条运动的产物。可以看出,前人所获红石泉铀矿床含矿主岩伟晶状白岗岩的形成年龄差异较大,归纳起来有1206~1296Ma、1690~1774Ma、1959Ma三组,究其原因可能与测试方法或仪器精度有关。

K-Ar法固有的缺陷,年龄误差可高达20%~30%。对于古老的岩石和经历过多期岩浆活动改造的地质体,不是一种可靠的定年方法<sup>[33]</sup>。后期岩浆活动及区域性热力作用常带来巨大的热量,会引起Ar扩散丢失,使获得的年龄低于岩体的形成时代。

Rb-Sr等时线法测试技术对样品要求很高,样品要具有相同的初始Sr同位素比值、相同的形成年龄、形成后未遭受后期地质作用改造<sup>[34]</sup>,且Rb、Sr活动性较强,Rb-Sr同位素体系封闭温度较低,Rb-Sr系统易被后期事件改造,全岩Rb-Sr等时线年龄值常低于实际年龄。与K-Ar法一样,Rb-Sr法易受后期岩浆事件的干扰,而研究区恰恰经历了多期继承性的岩浆事件。

锆石U-Th-Pb法测年在20世纪80年代恰逢



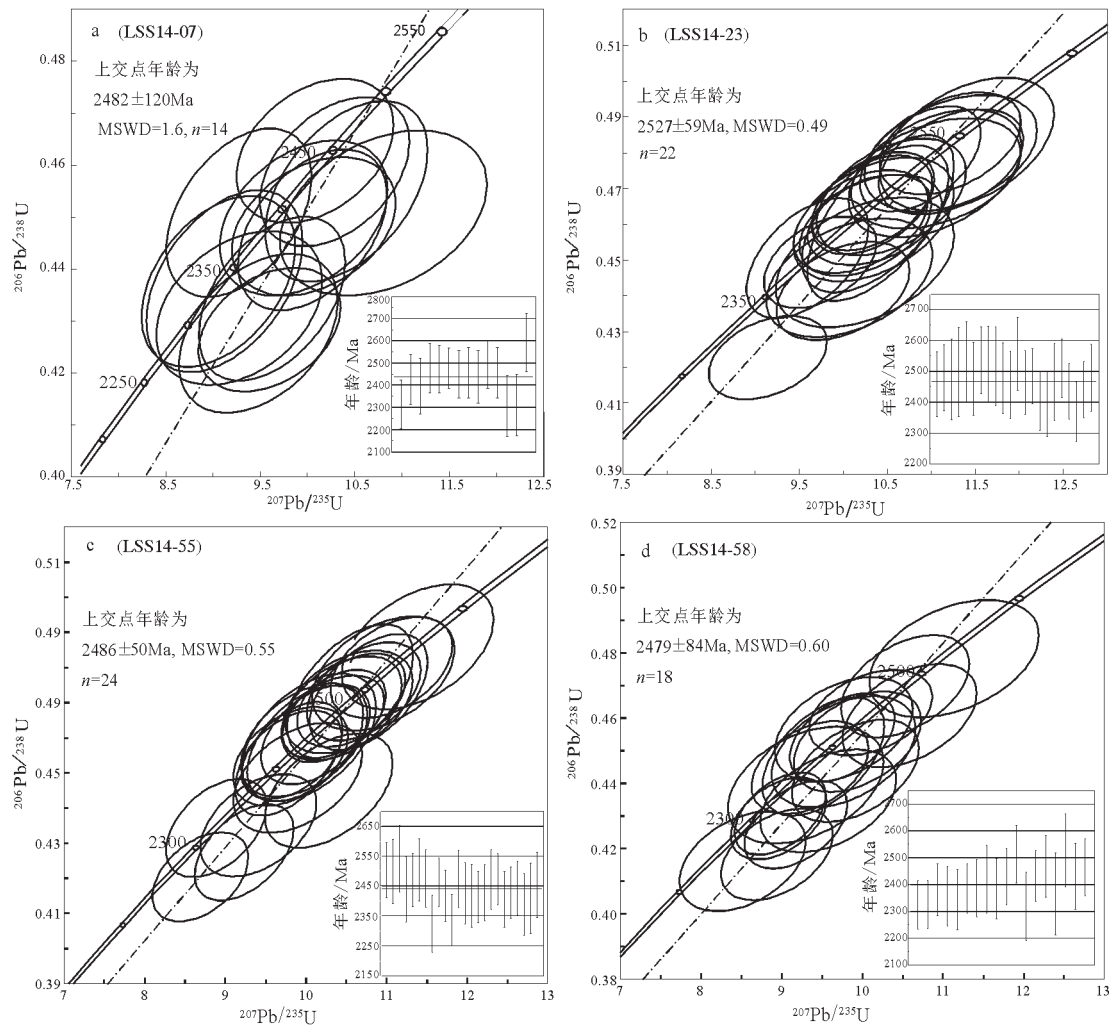


图4 红石泉伟晶状白岗岩锆石U-Pb年龄谐和图

Fig. 4 Zircons concordia age diagrams for the pegmatoidal alaskite in Hongshiquan area

中国相关实验室建设初期时开展,包括测试人员、仪器精度、实验条件等都不够成熟,很难保证测试结果的准确度。

目前LA-ICP-MS锆石U-Pb定年方法已经较成熟,因其原位、实时、高精度的特点而被广泛应用<sup>[34]</sup>。本次研究采用LA-ICP-MS锆石U-Pb定年方法,对甘肃红石泉伟晶状白岗岩的成岩年龄进行测定,4个测试样品的锆石年龄分别为 $2482 \pm 120$  Ma (MSWD=1.6,  $n=14$ )、 $2527 \pm 59$  Ma (MSWD=0.49,  $n=22$ )、 $2486 \pm 50$  Ma (MSWD=0.55,  $n=24$ )和 $2479 \pm 84$  Ma (MSWD=0.60,  $n=18$ )。得出的年龄结果基本一致,代表了甘肃红石泉地区伟晶状白岗岩中锆石的形成年龄。

因此,本次LA-ICP-MS锆石U-Pb定年获得

的2479~2527 Ma(平均为2493.5 Ma)年龄值,是红石泉铀矿床含矿主岩伟晶状白岗岩的成岩年龄,其形成时代为新太古代晚期—古元古代早期。

#### 4.2 成岩时的构造背景

白岗岩属于淡色花岗岩,其形成和演化与其所处的地质环境密不可分。淡色花岗岩是在大陆碰撞的晚期阶段,俯冲陆壳内的逆冲构造带局部高温、低压变质条件下陆壳部分熔融形成的,主要形成于造山带中,与碰撞过程或后碰撞阶段深熔作用关系密切<sup>[2-3,7,35-38]</sup>。

甘肃红石泉伟晶状白岗岩具有S型花岗岩特征,形成于中高温低压的后碰撞环境,岩浆源区主要来自于地壳。伟晶状白岗岩是龙首山群岩石经选择性重熔作用形成的花岗质岩浆结晶分异的产物,并对围岩

产生了热力作用和物质成分的改造<sup>[13-14,21]</sup>。

研究区位于华北克拉通西部阿拉善地块的龙首山地区,属于华北克拉通的一部分。华北克拉通是中国的古老地块之一,构造演化记录最完整也最复杂,记录了几乎所有的地壳早期发展与中生代以来的重大构造事件<sup>[39]</sup>。华北克拉通自古太古代陆核形成之后,在 2.9~2.7Ga 中太古代发生了第一次地壳大规模生长;在约 2.5Ga 新太古代晚期—古元古代早期经历了微陆块的拼合、局部地壳生长和克拉通化;在 1.95~1.82Ga 古元古代中期发生了俯冲—增生—碰撞造山及终极克拉通化;于 1.82~1.6Ga 古元古代晚期经历了克拉通基底整体抬升、裂隙槽—陆内裂谷的形成、大面积基性岩墙群的侵入和非造山岩浆活动;中元古代—早古生代都保持克拉通的整体稳定性<sup>[39-42]</sup>。以上证据间接说明,前人认为的红石泉白岗岩形成于 1750Ma 左右,与区域构造演化矛盾。

本次研究获得的伟晶状白岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 2479~2527Ma(平均为 2493.5Ma),华北克拉通在该时期处于局部地壳生长和微陆块的拼合,各微陆块以陆—陆、陆—弧及弧—弧碰撞的形式拼贴在一起,并伴随大量的岩浆作用和变质作用。

综上,红石泉伟晶状白岗岩是华北克拉通约 2.5Ga 岩浆构造热事件在西部地块的响应,属于新太古代晚期—古元古代早期微陆块拼合作用后期的产物。

#### 4.3 岩体与铀成矿的关系

红石泉伟晶状白岗岩型铀矿床为以岩体型铀矿化为主、后期叠加富集型铀矿化为辅的多期次—复成因铀矿床,最大特征是全岩体低品位铀矿化,65%以上的伟晶状白岗岩岩体的 U 含量大于 0.01%。矿体形态多呈脉状、透镜状、不规则状,单个矿体规模不大,沿走向、倾向延伸数十米至两百米,厚度 1.58~5.44m,矿体受伟晶状白岗岩体控制,产状与伟晶状白岗岩体的产状基本一致。

铀矿年龄测试较成熟的方法是通过 U-Pb 法测定晶质铀矿、沥青铀矿等含铀矿物,其分析手段较完善,准确度较高。近年有学者采用电子探针 Th-U-Pb 化学测年法对晶质铀矿、沥青铀矿等高铀矿物进行研究,但该方法现今仍处于探索阶段<sup>[43-45]</sup>。

戎嘉树等<sup>[16]</sup>用晶质铀矿 U-Pb 法测定矿化形成年龄,测得 9 个晶质铀矿的表面年龄存在差异,为求得矿化的真实年龄,将 9 个晶质铀矿的分析数据用

三阶段模式方程求解,得出上交点年龄为 1740±60~1740±62Ma,下交点年龄为 300±40~300±42Ma。同时对 12 个铀矿石进行了 U-Pb 同位素体系演化研究,按三阶段模式方程计算得出的矿化年龄为 1830±138~1830±152Ma,改造年龄为 342±118~342±132Ma,表明红石泉白岗岩型铀矿床的铀成矿年龄在 1740~1830Ma 之间,属中条期。

本次研究测得红石泉伟晶状白岗岩的成岩年龄为 2479~2527Ma(平均为 2493.5Ma),与铀的成矿年龄(1740~1830Ma)之间的矿岩时差达 739~787Ma,显然铀的成矿与白岗岩之间不可能存在成因上的关系,并非前人认为的铀成矿是白岗岩成岩晚期的产物,伟晶状白岗岩只是铀矿的含矿主岩。

## 5 结 论

(1)甘肃红石泉伟晶状白岗岩的成岩年龄为 2479~2527Ma(平均为 2493.5Ma),形成时代为新太古代晚期—古元古代早期。

(2)甘肃红石泉伟晶状白岗岩属于新太古代晚期—古元古代早期华北克拉通微陆块拼合作用后期的产物,是华北克拉通约 2.5Ga 岩浆构造热事件在西部地块的响应。

(3)红石泉铀矿床铀成矿与伟晶状白岗岩没有直接成因关系,伟晶状白岗岩只是铀矿的含矿主岩。

**致谢:**感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见和建议,感谢中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室激光烧蚀等离子质谱(LA-ICP-MS)微区分析实验室工作人员对锆石同位素测年工作给予的帮助。

## 参考文献

- [1]王木清,涂江汉,伍舒梅,等.红石泉矿床含矿主岩及矿化特征[J].放射性地质,1982,(5):390-396.
- [2]Nabelek P I, Liu M, Sirbescu M L. Thermo-rheological, shear heating model for leucogranite generation, metamorphism, and deformation during the Proterozoic Trans-Hudson orogeny, Black Hill, South Dakota[J]. Tectonophysics, 2001, 342: 371-388.
- [3]Vande F T, Hoernes S, Jung S, et al. Lower crustal melting and the role of open-system processes in the genesis of syn-orogenic quartz diorite-granite-leucogranite association: Constraints from Sr-Nd-O isotopes from the Bandoabaai Complex Namibia[J]. Lithos, 2003, 67: 205-226.
- [4]张宏飞, Harris N, Parrish R, 等.北喜马拉雅淡色花岗岩地球化学:区域对比、岩石成因及其构造意义[J].地球科学,2005,30(3):275-288.

- [5]于俊杰,曾令森,刘静,等.藏南定结地区早中新世淡色花岗岩的形成机制及其构造动力学意义[J].岩石学报,2011,27(7):1961-1972.
- [6]林彬,唐菊兴,郑文宝,等.西藏错那洞淡色花岗岩地球化学特征、成岩时代及岩石成因[J].岩石矿物学杂志,2016,35(3):391-406.
- [7]郭召杰,韩宝福,张志诚,等.中天山东段古生代淡色花岗岩的发现及其构造意义[J].岩石学报,2007,23(8):1841-1846.
- [8]高阳,范洪海,陈东欢,等.白岗岩型铀矿床:构造和岩浆作用耦合的产物[J].地质与勘探,2012,48(5):1058-1066.
- [9]郑有业,刘敏院,孙祥,等.西藏扎西康梯多金属矿床类型、发现过程及意义[J].地球科学,2012,37(5):1003-1014.
- [10]陈金勇,范洪海,陈东欢,等.纳米比亚欢乐谷地区白岗岩型铀矿矿石结构构造及其成因意义[J].矿物岩石地球化学通报,2014,33(1):91-97.
- [11]陈金勇,范洪海,王生云,等.纳米比亚欢乐谷地区白岗岩型铀矿成矿物质来源分析[J].地质学报,2016,90(2):219-230.
- [12]范洪海,陈金勇,顾大钊,等.纳米比亚欢乐谷地区白岗岩型铀矿床流体包裹体特征及成矿作用[J].矿床地质,2015,34(1):189-199.
- [13]杨春四,张树明,赵亚云,等.甘肃省龙首山白岗岩特征及其与铀成矿的关系[J].资源环境与工程,2017,31(1):18-22.
- [14]杨春四,张树明,许迅,等.甘肃红石泉伟晶状白岗岩岩相学和岩石地球化学[J].地质科技情报,2017,36(3):82-91.
- [15]王汝成,吴福元,谢磊,等.藏南喜马拉雅淡色花岗岩稀有金属成矿作用初步研究[J].中国科学:地球科学,2017,47(8):871-880.
- [16]戎嘉树,韩泽宏,夏毓亮.我国一岩体铀矿床的矿化特征及成矿作用[J].放射性地质,1984,2(2):1-11.
- [17]涂江汉.再谈红石泉铀矿床成因的若干问题[J].铀矿地质,1985,1(6):53-58.
- [18]张诚,金景福.红石泉铀矿床黑云母与晶质铀矿同步富集作用探讨[J].岩石矿物学杂志,1989,8(3):242-250.
- [19]孙圭,赵致和.中国北西部铀矿地质[M].西安:核工业西北地质局,1995.
- [20]赵建国,王龙成.红石泉铀矿床矿化特征及成因类型探讨[J].黄金科学技术,2009,17(1):38-41.
- [21]辛存林,马维云,安国堡,等.甘肃龙首山207铀矿床成矿地质特征及其成矿机制探讨[J].地质学报,2013,87(4):577-590.
- [22]辛存林,安国堡,孙现辉,等.龙首山成矿带207铀矿床矿化特征和外围铀成矿潜力分析[J].地质科技情报,2013,32(3):125-134.
- [23]赵新胤,汤琳.红石泉伟晶状白岗岩型铀矿黑云母特征及成矿作用[J].现代矿业,2015,31(4):104-105+108.
- [24]杨春四,张树明,赵亚云,等.甘肃红石泉铀矿床含矿主岩Sr-Nd-Pb同位素特征及意义[J].矿物学报,2015,35(S1):175-176.
- [25]黄净白,黄世杰.中国铀资源区域成矿特征[J].铀矿地质,2005,21(3):129-138.
- [26]Wiedenbeck M. Further characterisation of the 91500 zircon crystal[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2004, 28(1): 9-39.
- [27]Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. Chemical Geology, 2008, 257(1/2): 34-43.
- [28]Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotopes and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(2): 1535-1546.
- [29]Hanchar J M, Rudnick R L. Revealing hidden structures: The application of cathodoluminescence and back-scatter Electrical imaging to dating zircons from Lower crustal xenoliths[J]. Lithos, 1995, 36: 289-303.
- [30]Crofu F, Hanchar J M, Hoskin P W O. Atlas of Zircon Textures[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53: 469-495.
- [31]Hoskin P W O, Black L P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000, 18(4): 423-439.
- [32]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(5): 602-622.
- [33]赵玉灵,杨金中,沈远超.同位素地质学定年方法评述[J].地质与勘探,2002,38(2):63-67.
- [34]陈文,万渝生,李华芹,等.同位素地质年龄测定技术及应用[J].地质学报,2011,85(11):1917-1947.
- [35]郭素淑,李曙光.淡色花岗岩的岩石学和地球化学特征及其成因[J].地学前缘,2007,14(6):290-298.
- [36]高利娥,曾令森,刘静,等.藏南也拉香波早渐新世富钠过铝质淡色花岗岩的成因机制及其构造动力学意义[J].岩石学报,2009,25(9):2289-2302.
- [37]高利娥,曾令森,王莉,等.藏南马礼山高钙二云母花岗岩的年代学特征及其形成机制[J].岩石学报,2013,29(6):1995-2012.
- [38]王晓先,张进江,闫淑玉,等.藏南冲巴淡色花岗岩的地球化学特征、成因机制及其构造动力学意义[J].地学前缘,2016,23(1):264-275.
- [39]翟明国.克拉通化与华北陆块的形成[J].中国科学:地球科学,2011,41(8):1037-1046.
- [40]李江海,钱祥麟,侯贵廷,等.“吕梁运动”新认识[J].地球科学——中国地质大学学报,2000,25(6):15-20.
- [41]翟明国.华北克拉通的形成演化与成矿作用[J].矿床地质,2010,29(1):24-36.
- [42]朱日祥,陈凌,吴福元,等.华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J].中国科学:地球科学,2011,41(5):583-592.
- [43]郭国林,张展适,刘晓东,等.光石沟铀矿床晶质铀矿电子探针化学定年研究[J].东华理工大学学报(自然科学版),2012,35(4):309-314.
- [44]赵慧博,刘亚非,阳珊,等.电子探针测年方法应用于晶质铀矿的成因类型探讨[J].岩矿测试,2014,33(1):102-109.
- [45]唐傲,李光来,苏晔,等.赣中紫云山花岗岩晶质铀矿的电子探针U-Th-Pb化学定年[J].地球科学,2017,42(3):378-388.
- ①中国铀矿床研究评价第五卷下册.中国核工业地质局.2010.