

doi: 10.3969/j.issn.1007-3701.2014.03.001

基于重砂鉴定技术的火山岩锆石精选与测年方法关系探讨

马慧英, 孙海清, 罗来, 马铁球

MA Hui-Ying, SUN Hai-Qing, LUO Lai, MA Tie-Qiu

(湖南省地质调查院, 湖南长沙 410116)

(Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410116, China)

摘要:针对中浅变质沉凝灰岩锆石 U-Pb 同位素年龄分散幅度较大的现状,在湘中地区碧溪长安组底部凝灰岩几次采集样品测年不成功的情况下再次取样,通过室内重砂样品加工分选等工序,利用立体显微镜和偏光显微镜对锆石进行详细的矿物学特征对比分析,确定样品是否有来自不同时代、不同成因或不同地质背景的锆石。将精选出的锆石进行再次分选,分离成两组样品送往测年,采用 LA-ICP-MS U-Pb 法测得同沉积期的火山岩岩浆成因锆石年龄 751 ± 5 Ma 和构造岩浆热事件年龄 431.3 ± 4.3 Ma,两组年龄数据与区域地质事实吻合。由此认为对此类样品的锆石进行成因、形态与光学性质等方面的综合分析研究,将混合锆石进行分组,有助于同位素测年数据的有效集中,保证测年数据精度。本文研究表明重砂精细分析鉴定是同位素精准定年的基础。

关键词: 锆石; 分期分离; 凝灰岩; 重砂鉴定技术

中图分类号: P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1007-3701(2014)03-187-07

Ma H Y, Sun H Q, Luo L and Ma T Q. Application of heavy placer mineral identification for sorting zircons from volcanic rocks to improve geochronology method. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2014, 30(3):187-193.

Abstract: The current status is that isotopic dating of zircons from low-grade metamorphic tuff is often inaccurate and age scattering range large. The age tests for the initial tuff sampling in Chang'an Group bottom in Bixi, central Hunan Province are not successful. Nonetheless, through re-sampling by strictly conducting heavy concentrate sample processing and sorting procedures, and using stereo and polarizing microscopes to make comparative analyses on detailed mineralogical characteristics of zircon, it can discriminate the ages, causes or geological backgrounds of the zircon samples. The selected zircons are sorted again and separated into two phases for dating their ages and this time the LA-ICP-MS zircon U-Pb dating method is used to measure the sedimentary volcanic zircons and yielded age of 751 ± 5 Ma and the magmatic-tectonic thermal event age of 431.3 ± 4.3 Ma, which match the regional geological facts. Hence it is proved that comprehensive analyses of the causes, forms and other aspects of the optical properties can identify different zircons from low-grade metamorphic tuff, and the phasing and separating of mixed zircon can help improve effective centralized dating data and ensure the data accuracy. And this shows that fine analysis and identification of zircons on heavy concentrate is the basis of precise isotope dating.

Key Words: zircon; separated on different time; initial tuff; technology of heavy placer mineral identification

收稿日期: 2014-02-18; 修回日期: 2014-05-04.

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目(编号: 41030315); 中国地质调查局项目(编号: 1212011121108)资助.

第一作者: 马慧英(1981—), 女, 工程师, 主要从事地层年代学研究, E-mail: 32900556@qq.com.

1 引言

锆石作为自然界常见的副矿物,普遍存在于沉积岩、变质岩和岩浆岩中。由于具有特别稳定的晶体结构^[1-2]、能持久保持结晶时形成的物理化学特征、普通铅含量很低、富含放射性元素 U 和 Th 且封闭温度高,锆石成为 U-Pb 法同位素定年最理想的对象,在地质作用年代学研究中被广泛应用^[3-7]。

近年来,随着锆石测年技术成为确定成岩时代、成矿时代及古老地块年代的最为重要的定年方法,大量同位素定年数据也反映出新的“测年问题”,即时有测得的同位素数据峰值性不高乃至分散,谐和图测点偏离谐和线较远,以致分析结果可信度不高、得不到可靠的年龄值。对此问题的原因,以往学者认为是锆石封闭体系遭受破坏而使其中的放射成因 Pb 或 U 发生不同程度丢失或获得引起^[8-9]。笔者认为其主要因素大致可分两个方面:一是自然因素,即变形或变质作用使锆石所固有的结构发生变化,如锆石的蜕变、重结晶、扩散或增生等作用引起的变化;二是人为因素,包括样品野外采集和室内加工

(碎样、淘洗、挑选等)未严格按照相关要求执行,均有可能导致测试结果的准确度不够,特别是锆石鉴定及精选环节,容易将不同成因锆石混合,如将壳源型花岗岩中岩浆锆石与继承锆石混合,变质岩中原生锆石与增生变质锆石混合等^[10]。

本文在湘中地区碧溪长安组底部凝灰岩几次采集样品测年不成功的情况下再次取样,经室内重砂样品加工分选,利用立体和偏光显微镜对锆石进行详细的矿物学特征分析,确定样品存在两组(两期)锆石,经 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析定年得以验证。这一成果表明锆石形态学方面的研究与锆石 U-Pb 测年工作成败密切相关,对同类锆石进行分组有助于同位素测年数据的有效集中,保证测年数据的精度和有效性。该认识对测年锆石的分析 and 精选工作具有一定的借鉴意义。

2 样品的采集与处理

所采样品为南华系长安组底部的沉凝灰岩夹层(图 1),位于湘中地区新化县碧溪,样点地理坐标:东经 111°04'42",北纬 27°37'44"。

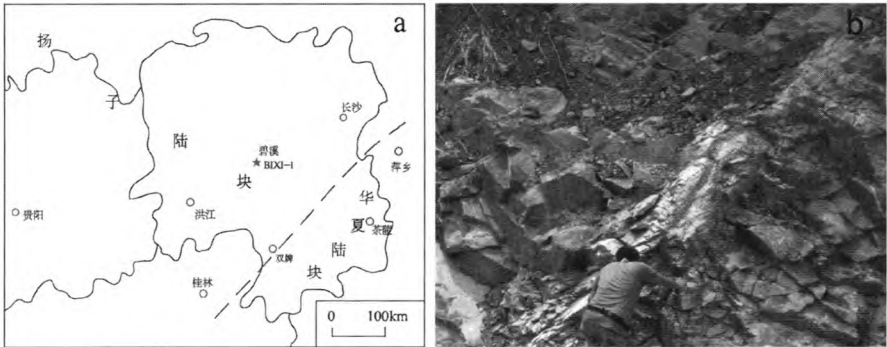


图1 凝灰岩采样位置
Fig. 1 Sample location of Tuff
a: 区域位置; b: 采样点露头.

此次为该点锆石测年的第三次采样,前两次锆石测年数据分散,无法进行数据分析。笔者分析认为其主要原因是把不同成因或产状的锆石混在一起所致,故本次的锆石挑选工作极其关键。

样品碎样和锆石挑选工作在湖南省地质调查院岩矿测试中心重砂实验室完成。首先根据标本中发现的最大锆石的粒径大小将样品粉碎至 60 目以下,避免破碎过细而得不到完整的锆石;其次,将同一个样品单独碎样、专门淘洗,保持仪器干净,尽量避免交叉

污染;第三,由于锆石属重砂矿物中的无磁性矿物,将破碎样经人工水洗和初淘后烘干再电磁选,磁选分离出来的无磁性部分矿物进行精淘以使锆石得以富集,最后在双目显微镜下逐个精选锆石颗粒(图 2)。

3 锆石矿物学研究

3.1 锆石晶体形态对比研究

在立体显微镜下对样品中所有锆石进行表面

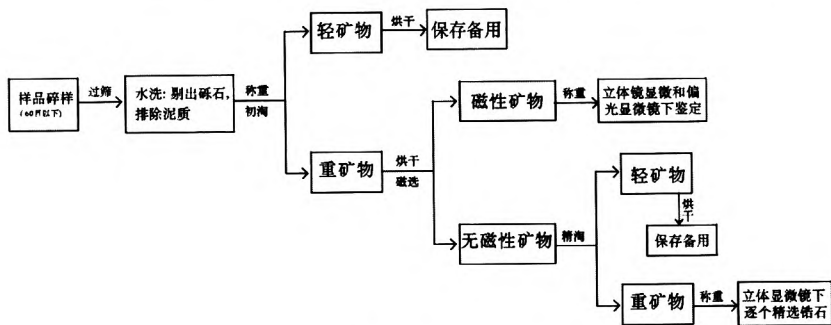


图2 锆石分离流程图

Fig. 2 Flow chart for zircons separation

形态研究后发现, 锆石可根据物理性质即晶形、颜色、光泽、透明度、粒径大小、晶面发育特征等差异分为 2 组(图 3-a), 其中第一组锆石含量较第二组锆石多, 占样品中锆石总含量的 82%左右。笔者对两组锆石进行挑选分离, 分别编号为 BIXI-1 和 BIXI-2(图 3-b, 3-c)后送北京国家地质实验测试

中心进行 U-Pb 年龄分析。

第一组(BIXI-1)锆石: 晶体呈自形的柱状晶, 个别呈顶角半磨圆的尖锥长柱状; 颜色以无色为主, 少数呈浅紫色、淡粉色、粉末白色; 透明, 金刚光泽, 断口不平 - 贝状(图 3-b); 硬度较大, 约 7-8; 粒径长 180 ~ 250 μm , 少数可达 300 μm , 柱状晶体

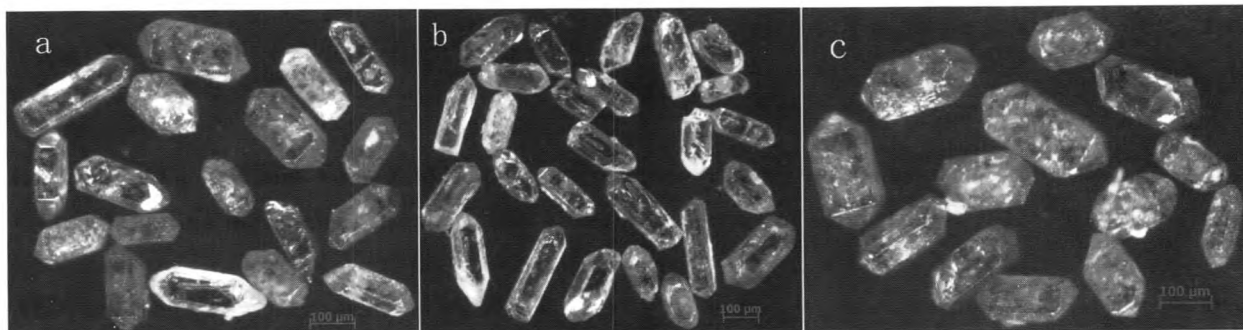


图3 立体显微镜下锆石形态

Fig. 3 Zircon morphology under stereo microscope

a: 前后期锆石混合在一起; b: 分离后的前期锆石; c: 分离后的后期锆石

长宽比约为 2:1 ~ 4:1, 长柱状晶体长宽比 $\geq 4:1$ 。晶面发育特征以{110}及{111}发育完全的聚形晶为主(图 4①), 亦有{100}及{311}发育完全、{110}和{111}发育不完全的聚形晶(图 4②), 个别见{110}和{111}发育完全、{311}发育不完全的聚形晶(图 4③)^[11-12]。

第二组(BIXI-2)锆石: 与 BIXI-1 相比, BIXI-2 晶体有较大区别, 其以自形的短柱状晶体为主, 少数呈柱状晶体; 颜色为褐色、深褐色, 粉末浅黄白色; 半透明 - 边缘透明, 表面光泽较 BIXI-1 相对暗淡且硬度稍降低, 约至 6; 另外 BIXI-2 可多见明显的裂纹和包裹物(图 3-c), 断口不平 - 贝状; 粒径长 170mm~280 μm , 短柱状晶体长宽比约为 1:1~2:1, 柱状晶体长宽比约为 2:1~4:1; 晶面发育特征呈{110}和

{111}发育完全的聚形晶(图 4④), 个别见{110}及{111}发育完全、{100}发育不完全的聚形晶(图 4⑤)^[11-12]。

3.2 锆石光性特征对比研究

以油浸法将矿物制成油浸薄片在偏光显微镜下观察^[13], 发现两组锆石均为一轴晶(+), 突起高、无解理、折光率和重折率高, 但是两组锆石的光性特征存在不少差异:

BIXI-1 锆石: 镜下呈无色, 透明, 含少量气态或液态包裹体, 晶棱和晶面清晰, 个别半磨圆的顶角呈不清晰状态(图 5-a)。

BIXI-2 锆石: 镜下呈浅黄褐色、浅褐色, 透明 - 半透明, 含较多气态或液态包裹体以及明显的裂纹, 晶面和顶角清晰可见, 黄褐色锆石具弱多色性(图 5-b)。

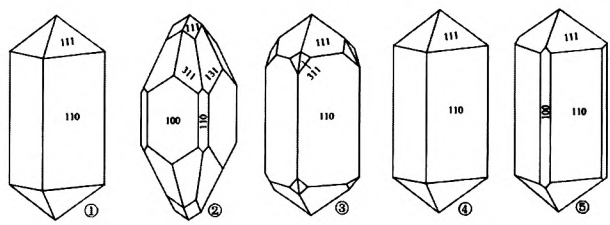


图4 锆石晶形图

Fig. 4 Figure of zircon crystal form

①-③: BIXI-1 锆石晶形, 呈柱状-长柱状晶; ④-⑤: BIXI-2 锆石晶形, 短柱状-柱状晶。

4 锆石 LA-ICP-MS 测年结果

两组锆石晶体测点的选取均结合了可见光和 CL 图像(图 6), 避开了锆石晶体中的裂纹和包裹体, 从而避免测定结果的偏差。

BIXI-1: 阴极发光图像均显示出岩浆结晶成分环带(图 6-a), 锆石 CL 图像色律强弱不等, 部分呈暗色, 这种差异可能反映了不同锆石之间 Th、U 等

元素的不同。部分锆石具有不分带、浑圆状的核心。U-Pb 年龄分析结果见表 1^[14]。27 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值变化在 $(781 \pm 14) \sim (734 \pm 13)$ Ma 之间, 加权平均年龄为 751 ± 5 Ma, MSWD=0.99。这些分析点都分布于谐和线上或附近(图 7), 表明这些锆石几乎没有 U 或 Pb 的丢失或加入, 结果可信度高。据此, 将沉凝灰岩时代确定为 751 ± 5 Ma, 其代表沉积地层(长安组)时代, 并可以作为南华系底界年龄^[15-18]。

BIXI-2: 阴极发光图像均显示出岩浆结晶成分环带(图 6-b), 锆石 U-Pb 年龄分析结果见表 2。13 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值变化在 $(442 \pm 8) \sim (411 \pm 7)$ Ma 之间, 其加权平均年龄为 431.3 ± 4.3 Ma (MSWD=1.05)。测点均落在谐和曲线上或附近且年龄相对集中(图 7), 样品测试结果可信度高。样品 BIXI-2 锆石 431.3 ± 4.3 Ma 的年龄与取样点西侧白马山加里东期岩体时代基本一致, 暗示此锆石可能受加里东期岩浆热事件影响^[19-21]。

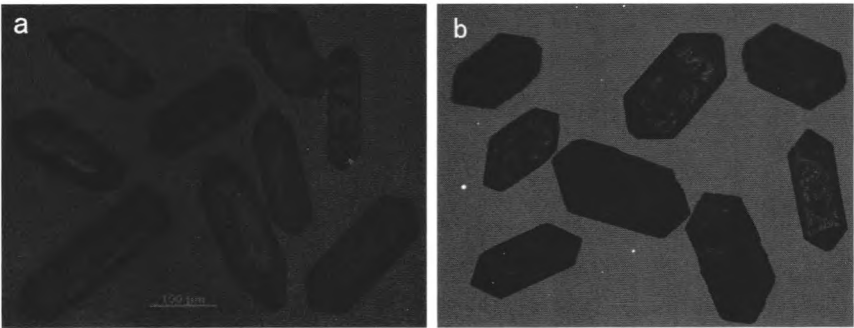


图5 偏光显微镜下油浸片锆石形态

Fig. 5 Zircon morphology under polarizing microscope of oil immersion piece

a: 分离后的前期锆石; b: 分离后的后期锆石

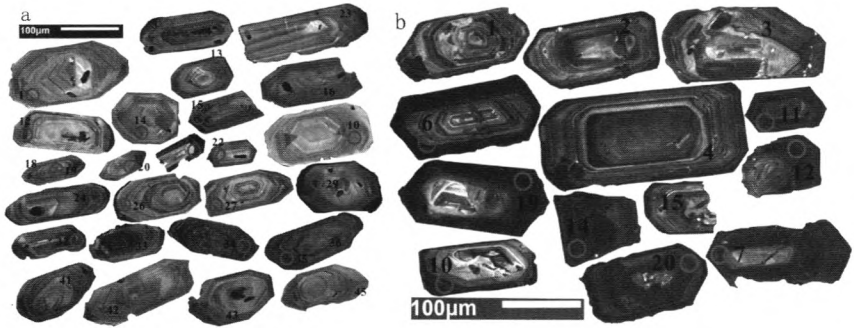


图6 锆石阴极发光图像

Fig. 6 CL images of zircons

(a: BIXI-1; b: BIXI-2)

表1 样品BIXI-1锆石LA-ICP-MS U-Th-Pb同位素分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb analysis data

测点号	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
		比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ
BIXI-1_1	0.79752	.0636	.0014	1.0767	.0279	.1248	.0024	727.7	47.0	742	13.6	758.3	13.6
BIXI-1_3	0.57569	.0915	.002	1.5767	.0385	.1289	.0025	1456.2	40.6	961.1	15.2	781.6	14.0
BIXI-1_10	1.06034	.0664	.0016	1.0976	.0322	.1234	.0024	819.8	49.0	752.2	15.6	750.1	13.5
BIXI-1_12	0.93972	.0715	.0017	1.2355	.0346	.1221	.0023	971.2	46.4	816.9	15.7	742.4	13.3
BIXI-1_13	0.67813	.0664	.0016	1.0718	.0324	.122	.0023	820.3	49.9	739.6	15.9	742	13.4
BIXI-1_14	0.84516	.0639	.0016	1.0647	.0330	.1229	.0024	739.7	51.2	736.1	16.2	747	13.5
BIXI-1_15	0.49421	.0678	.0015	1.1071	.0261	.1212	.0023	863.3	44.2	756.8	12.5	737.5	13.1
BIXI-1_16	0.87591	.0652	.0015	1.0856	.028	.1215	.0023	779.2	46.5	746.4	13.6	739.1	13.2
BIXI-1_18	0.41123	.0669	.0015	1.0979	.0272	.1220	.0023	834.3	45.4	752.3	13.1	742.3	13.2
BIXI-1_19	0.85112	.0653	.0015	1.0845	.0286	.1241	.0024	784.7	47.0	745.8	13.9	754.2	13.5
BIXI-1_20	0.91317	.0659	.0016	1.1549	.0334	.126	.0024	804.1	48.6	779.6	15.7	765	13.7
BIXI-1_21	1.14063	.0654	.0014	1.0991	.0271	.1227	.0023	788.4	45.6	752.9	13.1	746.2	13.3
BIXI-1_22	0.97220	.0665	.0016	1.1471	.0325	.1272	.0024	821.7	48.1	775.9	15.4	772	13.8
BIXI-1_23	1.03501	.0662	.0015	1.0889	.0281	.1206	.0023	813.8	46.3	748	13.6	734.1	13.1
BIXI-1_24	0.75087	.0677	.0015	1.1282	.0291	.125	.0024	858.2	45.9	766.9	13.9	759.2	13.5
BIXI-1_26	0.56808	.0645	.0016	1.0908	.0333	.1211	.0023	758.7	50.6	748.9	16.2	737.2	13.2
BIXI-1_27	0.40137	.0638	.0015	1.0842	.0309	.122	.0023	735.4	49.1	745.7	15.1	741.8	13.2
BIXI-1_29	1.62311	.0663	.0015	1.1837	.0285	.1288	.0024	817.1	44.8	793	13.2	781.2	13.8
BIXI-1_32	0.97214	.0669	.0015	1.1456	.028	.1262	.0024	836.7	45.1	775.2	13.2	766.2	13.5
BIXI-1_33	0.81087	.0674	.0015	1.1551	.0292	.1256	.0024	851.6	45.6	779.6	13.8	762.5	13.4
BIXI-1_34	0.25764	.0651	.0014	1.0876	.0236	.1225	.0023	779.2	43.7	747.3	11.5	745.1	13.1
BIXI-1_35	1.03293	.0666	.0014	1.1352	.0264	.1221	.0023	825.1	44.4	770.2	12.5	742.8	13.1
BIXI-1_36	1.07348	.0658	.0015	1.0911	.0279	.1212	.0023	801.6	46.3	749	13.6	737.6	13.0
BIXI-1_41	0.83834	.0651	.0015	1.0976	.0298	.1253	.0023	776.1	47.8	752.2	14.4	761	13.4
BIXI-1_42	0.84758	.0645	.0015	1.0682	.0282	.1214	.0023	757.7	47.5	737.9	13.8	738.5	13.0
BIXI-1_43	0.89978	.0656	.0015	1.1254	.0309	.1249	.0023	792.5	47.8	765.6	14.8	758.7	13.4
BIXI-1_45	0.87796	.0657	.0015	1.1354	.0307	.1238	.0023	795.6	47.5	770.3	14.6	752.1	13.2

据孙海清等(2014)^[4];测试单位:北京国家地质实验测试中心.

表2 样品BIXI-2锆石LA-ICP-MS U-Th-Pb同位素分析结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb analysis data

测点号	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
		比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ
BIXI-2_1	1.0625	0.0594	0.0012	0.5141	0.0107	0.0688	0.0013	582.2	44.45	421.2	7.1	428.8	8.0
BIXI-2_2	1.2964	0.0960	0.0020	0.8274	0.0180	0.0701	0.0014	1547	39.09	612.2	10.0	436.5	8.1
BIXI-2_3	0.2706	0.0560	0.0012	0.5000	0.0103	0.0681	0.0013	450.4	45.05	411.7	7.0	424.4	7.9
BIXI-2_4	0.6741	0.0558	0.0012	0.5122	0.0106	0.0685	0.0013	443.9	45.11	419.9	7.1	427.0	7.9
BIXI-2_6	0.6756	0.0882	0.0018	0.8626	0.0183	0.0710	0.0014	1386.5	39.43	631.5	10.0	442.1	8.2
BIXI-2_7	0.3431	0.0599	0.0012	0.5352	0.0111	0.0703	0.0013	600.9	44.29	435.2	7.3	437.7	8.1
BIXI-2_10	0.2528	0.0670	0.0014	0.5714	0.0120	0.0660	0.0013	838.5	43.01	458.9	7.8	411.8	7.6
BIXI-2_11	0.4568	0.0585	0.0012	0.5203	0.0103	0.0685	0.0013	548.3	44.43	425.3	6.9	427.1	7.9
BIXI-2_12	0.2261	0.0630	0.0013	0.5565	0.0109	0.0705	0.0013	708.1	42.52	449.2	7.1	439.3	8.1
BIXI-2_14	0.3840	0.0569	0.0012	0.5145	0.0103	0.0693	0.0013	488.2	44.59	421.5	6.9	431.9	7.9
BIXI-2_15	0.5862	0.0586	0.0012	0.5641	0.0121	0.0703	0.0013	553.1	45.57	454.2	7.9	438.0	8.1
BIXI-2_19	0.2340	0.0584	0.0012	0.5264	0.0104	0.0697	0.0013	542.9	43.79	429.4	6.9	434.3	8.0
BIXI-2_20	0.6372	0.0618	0.0013	0.5367	0.0106	0.0691	0.0013	667.9	43.01	436.2	7.0	430.9	7.9

测试单位:北京国家地质实验测试中心

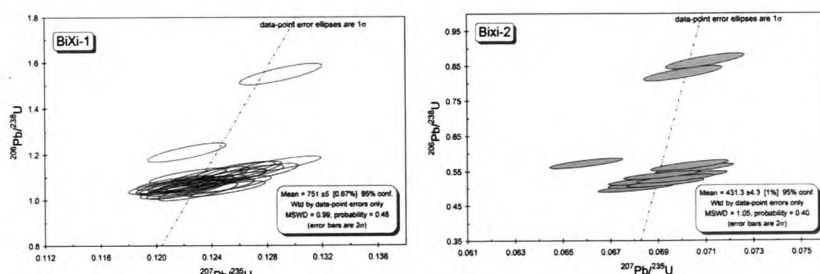


图7 锆石U-Pb年龄谱和图

Fig. 7 Concordia diagram of zircon U-Pb ages

5 结论

(1) 不同环境中形成的锆石具有不同的结构特征,重砂鉴定的锆石精选过程中通过对锆石形态学方面的详细研究可以区分出不同期次和成因的锆石。

(2) 在进行锆石 U-Pb 定年前,应先对锆石进行系统分析和综合研究,区分出不同成因锆石,在此基础上对锆石进行 U-Pb 分析可获得可靠的年龄结果。

(3) 本次所采样品的测试数据集中度高,两组年龄均与区域地质事实相吻合,说明重砂鉴定的锆石精选技术与锆石测年关系紧密,将不同特征和不同成因背景的锆石进行分离是获得可靠年龄数据的基本保障。

锆石精选及分离工作与杨茂群老师进行了深刻而有益的探讨,偏光显微镜下锆石照相得到了刘南的帮助,审稿专家提出了诸多建设性修改意见,作者一并表示感谢!

参考文献:

- [1] 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, 33(3): 161-174.
- [2] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 2009, 28(4): 481-492.
- [3] 徐平, 吴福元, 谢烈文, 杨岳衡. U-Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素[J]. 科学通报, 2004, 49(14): 1403-1410.
- [4] Goldfarb R J, Phillips G N, Nokleberg W J. Tectonic setting of synorogenic gold deposits of the Pacific Rim [J]. Ore Geology Reviews, 1998, 13: 185-218.
- [5] Buick R, Thornett J R, M C Naughton N J, Smith J B, Barley M E, Savage M. Record of emergent continental crust similar to 3.5 billion years ago in the Pilbara craton of Australia [J]. Nature, 1995, 375: 574-575.
- [6] 谢桂青, 胡瑞忠, 蒋国豪, 赵军红. 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.
- [7] 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.
- [8] 高林志, 丁孝忠, 庞维华, 刘燕学, 陆松年, 刘耀荣, 陈峻, 张玉海. 湘东北前寒武纪仓溪岩群变凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 2011, 30(10): 1479-1484.
- [9] 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, 16(8): 1589-1604.
- [10] 简平, 程裕淇, 刘敦一. 变质锆石成因的岩相学研究——高级变质岩 U-Pb 年龄解释的基本依据 [J]. 地学前缘, 2001, 89(3): 183-191.
- [11] 湖南省地质局. 湖南重砂矿物图册[M]. 湖南: 地质出版社, 1982.
- [12] 广东省地质局中心实验室, 地质部第二海洋地质大队实验室. 重砂矿物图册[M]. 地质出版社, 1979.
- [13] 吕菊蕊, 高继峰. 矿物组合及元素组合在重砂鉴定中的应用[J]. 甘肃科技, 2011, 27(17): 47-49.
- [14] 孙海清, 黄建中, 杜远生, 罗来, 伍皓. 扬子地块东南缘南华纪长安组同位素年龄及其意义 [J]. 地质科技情报, 2014, 33(2): 15-20.
- [15] 王剑. “南华系”地层研究新进展——论“南华系”地层划分对比问题[J]. 地质通报, 2005, 24(6): 491-495.
- [16] 王剑, 李献华, Duan T Z, 宋彪, 李忠雄, 高永华. 沧水铺火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及“南华系”底界新证据[J]. 科学通报, 2003, 48: 1726-1731.
- [17] 尹崇玉, 刘敦一, 高林志, 王自强, 邢裕盛, 简平, 石玉若. 南华系底界与古城冰期的年龄: SHRIMP 定年证据[J]. 科学通报, 2003, 48(16): 1721-1725.
- [18] 陆松年. 关于中国新元古界划分几个问题的讨论[J]. 地质论评, 2002, 48(3): 242-248.
- [19] 王磊, 龙文国, 周岱. 云开地区加里东期花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 2013, 40(4): 1016-1029.
- [20] 肖冬贵, 陈必河, 倪艳军, 郑基俭. 湖南雪花顶加里东期花岗岩特征及成因[J]. 国土资源导刊, 2008, 5(4): 30-34.
- [21] 曾雯, 张利, 周汉文, 钟增球, 向华, 刘锐, 靳松, 吕新前, 李春忠. 华夏地块古元古代基底的加里东期再造: 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和微量元素制约 [J]. 科学通报, 2008, 53(3): 335-344.