

https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.231



# 四川会理芭蕉箐地区钠长岩 地球化学、年代学特征及其意义

刘亚杰<sup>1</sup>, 徐争启<sup>1,2,3\*</sup>, 宋昊<sup>1,2</sup>, 李涛<sup>1</sup>, 张苏恒<sup>1</sup>, 姚建<sup>4</sup>

1. 地学核技术四川省重点实验室, 四川成都 610059
2. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059
3. 地球勘探与信息技术教育部重点实验室, 四川成都 610059
4. 核工业二八〇研究所, 四川广汉 618300

**摘要:** 四川会理芭蕉箐地区位于康滇地轴中南段, 是我国少有的元古宙产铀地区, 其构造条件复杂, 研究程度低, 钠长岩作为本区重要的含铀岩石, 对其更是鲜有报道, 严重限制了进一步的铀矿勘查。在结合前人研究的基础上, 通过对芭蕉箐地区 1841 铀矿化点的野外地质调查、钠长岩元素地球化学分析及锆石 U-Pb 年代学测试分析, 发现研究区钠长岩分为岩浆钠长岩与交代钠长岩, 样品富集 Th、U、Zr、REE 等元素, 相对贫 Ba、K、Sr、Rb 等元素, 测年结果显示两类钠长岩主要峰值年龄为 ~2.3 Ga 与 ~1.8 Ga。钠长岩岩石来源主要为下地壳变质泥岩部分熔融且有幔源物质加入, 形成于陆内拉张构造环境。其原岩的形成与 2.4~2.3 Ga 期间发生在扬子地台西南缘的碰撞事件有关, 并在 1.8 Ga 左右经历岩浆作用形成钠长岩, 同时铀元素在此处大量富集。其年代学数据记录的两次岩浆活动, 是 Columbia 超大陆聚合在扬子地块西南缘的响应。

**关键词:** 扬子地块西南缘; Columbia 超大陆; 钠长岩; 地球化学; 锆石 U-Pb 定年; 岩石学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2024)03-893-14

收稿日期: 2022-03-23

## Geochemical and Chronological Characteristics and Significance of Albite in Bajiaoqing Area, Huili, Sichuan

Liu Yajie<sup>1</sup>, Xu Zhengqi<sup>1,2,3\*</sup>, Song Hao<sup>1,2</sup>, Li Tao<sup>1</sup>, Zhang Suheng<sup>1</sup>, Yao Jian<sup>4</sup>

1. Applied Nuclear Techniques in Geosciences Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610059, China
2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
3. Key Laboratory of Earth Exploration and Information Techniques, Ministry of Education, Chengdu 610059, China
4. 280 Institute of Nuclear Industry, Guanghan 618300, China

**Abstract:** Located in the middle and southern part of the Kangdian axis, Bajiaoqing area in Huili, Sichuan Province is a rare Proterozoic uranium mining area in China. However, the relevant study is insufficient due to its complex structural conditions, and hardly any research has been reported on albite, an important uranium bearing rock in this area, which seriously restricts further uranium exploration. On the basis of previous studies, through the field geological survey of 1841 uranium mineralization points in

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(No. 41872079); 中国核工业地质局科研项目(No. 202137-3); 成都理工大学珠峰科学研究计划项目(No. 2021ZF11413); 四川省应用基础研究项目(No. 2020YJ0361)。

**作者简介:** 刘亚杰(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事矿床地球化学方面研究。ORCID: 0000-0002-7872-1284. E-mail: chinaajie@qq.com

\* **通讯作者:** 徐争启, ORCID: 0000-0002-0266-149X. E-mail: 547510779@qq.com

**引用格式:** 刘亚杰, 徐争启, 宋昊, 李涛, 张苏恒, 姚建, 2024. 四川会理芭蕉箐地区钠长岩地球化学、年代学特征及其意义. 地球科学, 49(3): 893-906.

**Citation:** Liu Yajie, Xu Zhengqi, Song Hao, Li Tao, Zhang Suheng, Yao Jian, 2024. Geochemical and Chronological Characteristics and Significance of Albite in Bajiaoqing Area, Huili, Sichuan. *Earth Science*, 49(3): 893-906.

Bajiaoqing area, the geochemical analysis of rock elements of albite and the test analysis of zircon U-Pb chronology, it is found that albite in the study area is divided into magmatic albite and metasomatic albite. The samples are enriched in Th, U, Zr and REE, and relatively depleted in Ba, K, Sr and Rb. The dating results show that the two main peak ages are  $\sim 2.3$  Ga and  $\sim 1.8$  Ga. The albite is mainly derived from the partial melting of metamorphic mudstone in the lower crust and the addition of mantle derived materials, which was formed in the tectonic environment of intracontinental rift. The formation of its protolith is related to the collision event in the southwest margin of the Yangtze platform during 2.4–2.3 Ga, and underwent magmatism at about 1.8 Ga to form albite, and U element is enriched here. The two magmatic activities recorded by its chronological data are the response of the convergence of Columbia supercontinent in the southwest margin of the Yangtze block.

**Key words:** Southwest margin of Yangtze block; Columbia supercontinent; albite; geochemistry; zircon U-Pb dating; petrology.

## 0 引言

康滇地轴位于扬子地台西南缘,南北走向长约 700 km、东西宽数十公里,呈南北向狭长条带状分布(朱华平等, 2011)。前人研究发现,康滇地轴有大量的轴异常点,但规模小、分布散,且受后期地质作用影响较大,导致研究难度大研究程度较低(张成江等, 2015)。

四川省会理县芭蕉箐地区位于康滇地轴中段,该区域地质条件复杂,构造活动频繁,岩石破碎,具备良好的铀成矿条件。虽然该地区陆续有地质工作人员对其进行勘查,但总体而言,芭蕉箐地区的工作程度较低,且现有的研究主要是针对铀矿化特征的分析,对该地区主要赋矿围岩——钠长岩的研究更是少之又少。此外,扬子地台在 Columbia 超大陆聚合中的角色与定位充满争议,特别是在演化时间、超大陆构型、聚合-裂解过程等方面争议较多(Cui *et al.*, 2019; 邱啸飞等, 2019; 邓奇等, 2020), Rogers and Santonsh(2002)在重建模型中就并未将其考虑进去,但近年来出现的诸多证据表明扬子地台存在与 Columbia 超大陆聚合有关的岩浆-变质活动,如年代约 2.15 Ga 的崆岭杂岩(Han *et al.*, 2017)、云南撮科地区  $\sim 2.360$  Ma 的二长花岗岩(Cui *et al.*, 2019)、湖北钟祥地区 2.00~1.93 Ga 的同碰撞花岗岩(Wang and Dong, 2019)等。然而这方面在扬子地台西南缘的记录较少,芭蕉箐地区的岩浆活动记录更是鲜有报道。

鉴于此,本文在收集前人资料的基础上,对芭蕉箐地区钠长岩进行了野外调查以及室内研究工作。通过钠长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年,并结合岩石地球化学研究,对其形成时代和岩浆活动提出一些新的认识,对芭蕉箐地区铀矿勘查提供新的参考,为扬子陆块参与 Columbia 超大陆聚合提供新的证据。

## 1 区域地质概况及样品特征

研究区位于四川省会理县通安镇芭蕉箐地区 1841 铀矿化点,大地构造位置处在扬子地台西南缘康滇地轴中南段的滇南北带与南岭东西带西延交界处,位于皎平-铜厂-杨武断裂带上(图 1),该地区构造活动频繁,构造形态复杂、类型多样,不同期次构造运动相互叠加,褶皱和断裂高度发育,南-北向次生断裂较多(李涛等, 2021)。研究区区域上主要出露中元古代地层,与川西-滇中一带的会理群、大红山群、东川群、河口群、通安组、汤丹群及昆阳群共同组成了康滇地轴基底岩系。区域岩浆岩以中基性侵入岩为主,零星有中基性喷出岩出露,主要为辉绿岩、辉长岩、玄武岩、凝灰岩及钠长岩等,此外,该区域岩浆岩后期遭受了不同程度的蚀变作用,表现出不同程度的绿泥石化、方解石化及绢云母化等。该区域得益于复杂的地质条件,其矿产资源丰富,分布有:四川会理新铺子铁矿(胡忠忠等, 2005)、会理拉拉铜-铁-铀多金属矿(宋昊, 2014)、会理黎溪黑箐铜矿(刘增铁等, 2010)等。

通过野外观察,芭蕉箐 1841 铀矿化区的钠长岩共分为两种,一种为岩浆成因钠长岩(图 2a),另一种是交代成因钠长岩(图 2b)。岩浆钠长岩呈脉状侵入富含碳质板岩的地层围岩中,是岩浆沿断层及断裂运移至地层内并结晶的结果,主要由他形粒状的钠长石、互混的绿泥石-绢云母以及胶结物组成,其中钠长石约占 40%,粒径约 0.1~0.5 mm,碎裂化极为发育,裂隙中充填有互混的绿泥石-绢云母,镜下可见卡式双晶(图 2c)。交代钠长岩呈块状构造,微晶-变晶粒状结构,主要由半自形-他形粒状的石英、他形粒状的钠长石、短柱状电气石及少量的不透明矿物等组成,其中钠长石约占 38%,粒径约 0.01~0.15 mm,岩石裂隙发育,碎裂化严重,裂隙中充填石英、电气石、氧化铁质等(图 2d)。

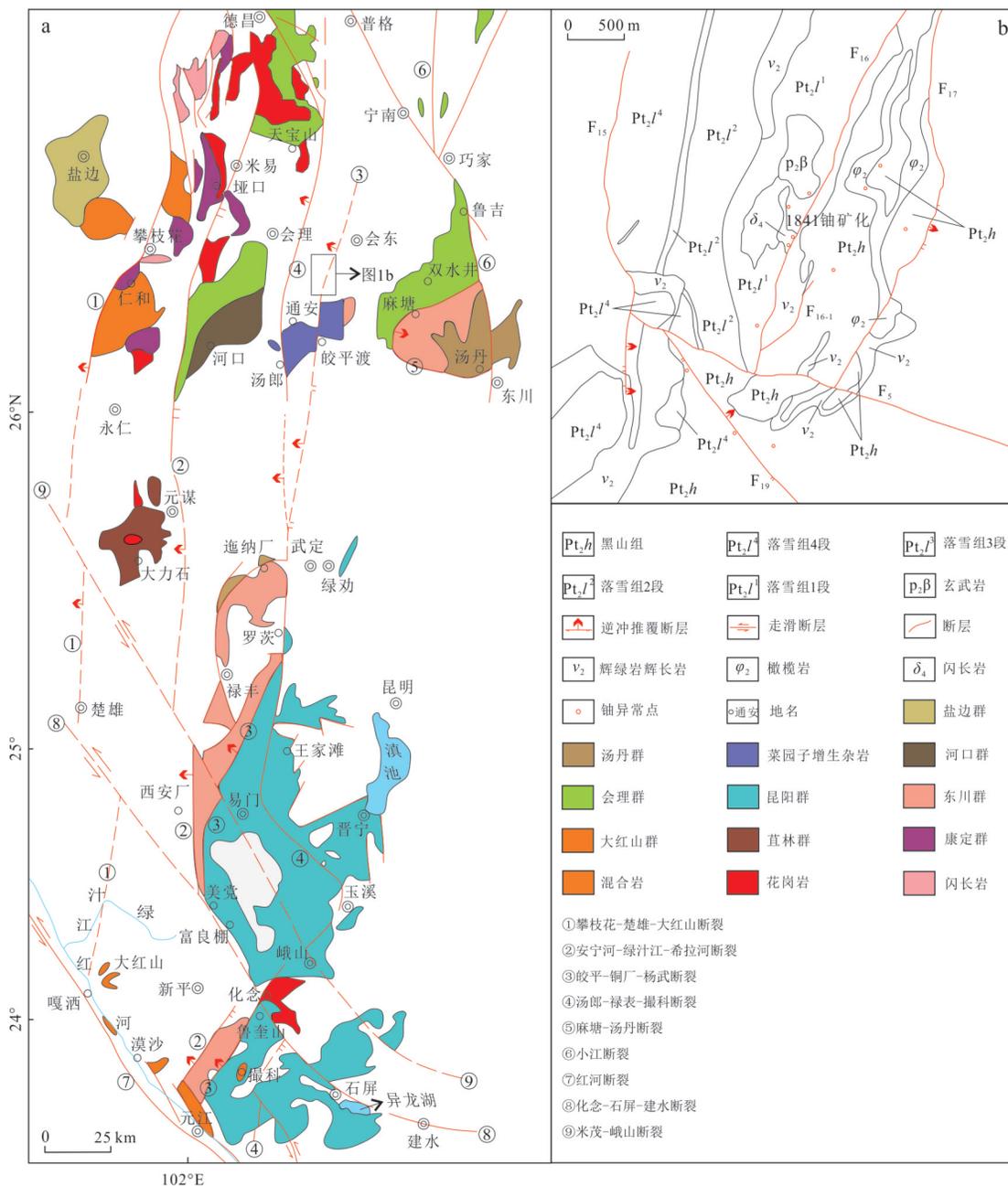


图 1 研究区地质简图(据耿元生等,2017)

Fig.1 Simplified tectonic map of Bajiaojing area (modified after Geng *et al.*, 2017)

## 2 分析方法

本次样品均采自远离矿体周围的新鲜岩石.全岩主微量元素和稀土元素的测试工作均在核工业二二〇研究所完成.样品的主量元素通过XRF进行测定分析,其中烧失量采用《DZG93-05 国家标准》中的重量法进行测定,微量元素、稀土元素在用氢氟酸、硝酸消解后由等离子质谱仪分析测定.

样品重矿物及锆石的挑选工作由广州拓岩检测技术有限公司完成.将需测样品破碎

至 80~100 目,其后通过浮选、重液、离心以及电磁选等选矿技术对各矿物组分进行初步分选,挑选出存在锆石的重矿物部分,放置于双目镜下由人工进行锆石挑选,制靶完成后,对其进行阴极发光、透射光和反射光拍照.

锆石 U-Pb 测年在广州市拓岩检测技术有限公司利用 LA-ICP-MS 完成.激光剥蚀系统(LA)是由美国 ESI 公司生产的 NWR 193 准分子激光器( $\lambda=193\text{ nm}$ )和光学系统构成,电感耦合等离子质谱仪(ICP)由赛默飞世尔科技有限公司生产,型号为

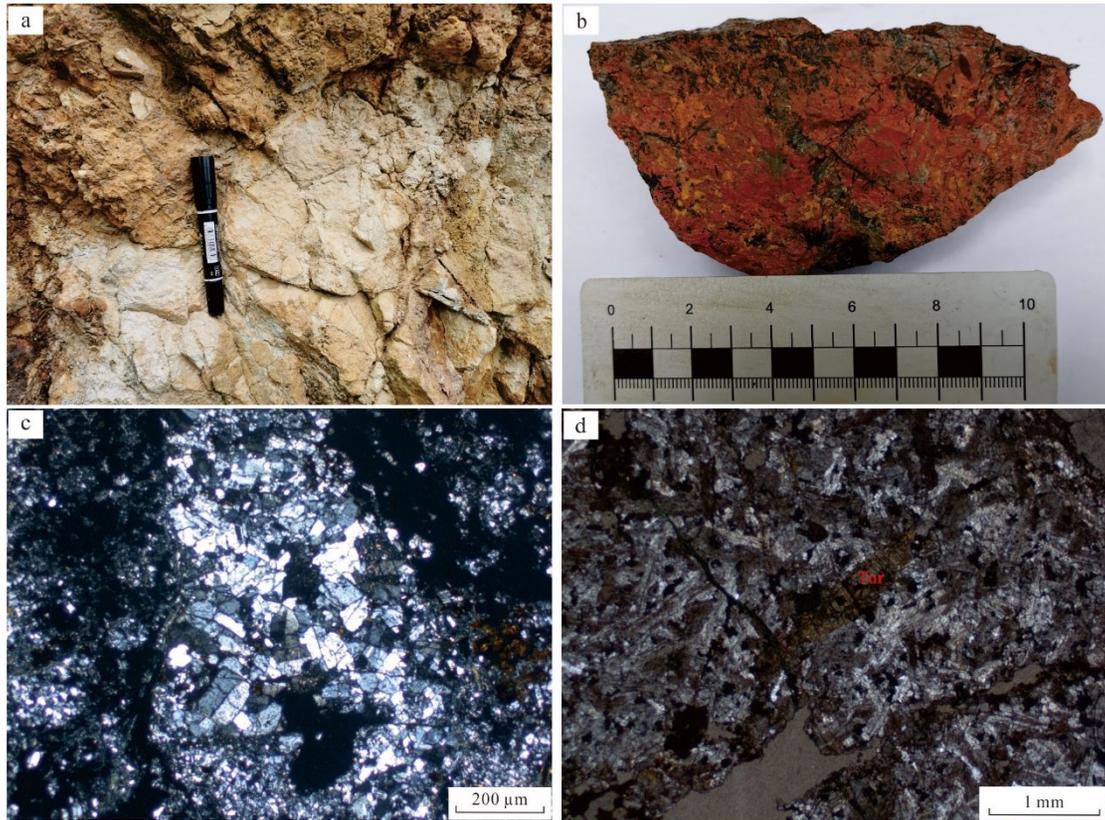


图2 芭蕉箐1841铀矿化区钠长岩野外与镜下照片

Fig.2 Field and microscopic photos of albitite in Bajiaoqing 1841 uranium mineralization area

a和c. 岩浆成因钠长岩; b和d. 交代成因钠长岩; Tur. 电气石

iCAPRQ. 锆石 U-Pb 同位素测年之前用玻璃标样 NIST 610 调节 ICP 仪器灵敏度、Th/U 比值以及氧化物产率. 每个样品包括 15 s 的空白信号、45 s 的样品信号采集以及 35 s 的吹扫阶段. 锆石 U-Pb 同位素定年利用标准锆石样品 91500 进行同位素比值的校正, 以标准锆石 Plešovice 为质量监控标样, 检验 U-Pb 定年数据的准确性. 原始数据的离线处理利用 ICPMS-DataCal 完成.

### 3 分析结果

#### 3.1 岩石地球化学特征

表 1~3 分别为芭蕉箐地区钠长岩的主微量元素和稀土元素分析结果(质量含量), 其中样品 DH04、DB02、DB03 为岩浆钠长岩, DB05、DB07 为交代钠长岩. 钠长岩的  $\text{SiO}_2$  含量为 59.10%~70.50%,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量为 6.06%~9.20%,  $\text{K}_2\text{O}$  含量为 0.41%~1.49%,  $\text{TiO}_2$  含量为 0.70%~3.12%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 14.01%~18.43%,  $\text{MgO}$  含量为 0.27%~1.30%,  $\text{CaO}$  含量为 0.14%~1.48%. 总体上芭蕉箐

地区的钠长岩具有高  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  和低  $\text{K}_2\text{O}$  含量的特征, 反映岩浆钠长岩与交代钠长岩密切相关.

岩浆钠长岩的微量元素基本高于交代钠长岩, 且岩浆钠长岩极富 U、Pb 元素(图 3). 整体上两种钠长岩均具有富集 Th、U、Zr、REE 等高场强元素, 相对贫 Ba、K、Sr、Rb 等大离子亲石元素的特征.

两种钠长岩的稀土元素有一定差异. 岩浆钠长岩的 LREE/HREE 值在 2.69~3.11 之间,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值在 1.72~4.50 之间, 说明轻重稀土分异不明显, 具有 Eu 的正异常或无异常(图 3). 交代钠长岩 DB07 极富轻稀土, LREE/HREE 的值为 16.77,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值为 42.02, 且有较高的 Mg、Al、K 元素, 较低的 Si 元素, 可能与后期的蚀变作用有关, 轻重稀土分异程度高; 而 DB05 轻重稀土分异不明显, 总体上 REE 配分模式曲线呈右倾的状态, 具有负 Eu 异常.

#### 3.2 锆石 U-Pb 年龄

**3.2.1 样品 DH01** 在交代钠长岩样品 DH01 选取了 24 颗锆石进行测年分析, 剔除 4 号(丢失)测点, 共获得 23 个有效测点(表 4). 根据表 4 可知该样品  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄在  $(1\ 854 \pm 29.2)$  Ma 到  $(2\ 783 \pm$

表 1 钠长岩主量元素测试结果 (%)

Table 1 Test results of major elements in albite (%)

编号	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	LOI	总量	A/ CNK	A/ NK	Mg <sup>#</sup>
DH04	0.61	18.18	59.10	0.37	8.87	0.70	0.41	3.21	0.22	0.38	4.57	0.40	1.77	98.79	1.82	1.90	19.59
DB02	1.01	18.43	63.19	0.18	7.82	1.49	0.46	0.70	0.04	0.49	3.68	0.27	1.98	99.75	1.89	1.98	32.15
DB03	1.30	16.62	62.91	0.29	7.63	1.17	1.48	1.53	0.09	1.30	2.54	0.34	2.73	99.94	1.62	1.89	39.28
DB05	0.31	14.01	70.50	0.27	6.06	0.41	0.22	0.70	0.03	0.58	3.76	0.80	2.08	99.74	2.09	2.16	12.17
DB07	0.57	16.70	62.87	0.36	6.14	0.85	0.32	0.79	0.02	0.55	5.30	1.78	3.49	99.74	2.29	2.39	16.15

表 2 钠长岩微量元素测试结果 (10<sup>-6</sup>)

Table 2 Test results of trace elements in albite (10<sup>-6</sup>)

编号	Sc	Ni	V	Cr	Cu	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Hf	Ta	Pb	Th	U
DH04	22.4	22.0	170	77.6	3 592	14.5	13.7	32.3	123.0	339.0	17.50	98.4	5.66	1.39	365.00	9.74	2 506.00
DB02	37.6	15.7	260	128.0	10 107	25.2	32.3	72.5	167.0	1 640.0	6.57	237.0	12.90	0.76	1 383.00	20.70	1 520.00
DB03	29.2	16.0	155	98.8	9 859	21.4	22.1	53.8	182.0	1 690.0	14.40	116.0	14.10	1.46	1484.00	25.00	1 950.00
DB05	16.5	92.8	123	61.1	1 174	14.2	18.1	13.8	26.2	95.9	1.96	26.2	2.88	0.26	2.75	11.90	9.84
DB07	14.6	138.0	129	60.9	1 859	26.4	30.0	26.5	53.1	135.0	3.29	38.0	4.09	0.40	13.70	9.74	12.80

表 3 钠长岩稀土元素测试结果 (10<sup>-6</sup>)

Table 3 Test results of rare earth elements in albite (10<sup>-6</sup>)

编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE/ HREE	(La/ Yb) <sub>N</sub>	δEu	δCe
DH04	40.00	114.0	17.20	77.5	26.50	10.10	31.70	5.76	29.80	5.14	11.00	1.24	6.38	0.78	377.10	3.11	4.50	1.06	1.06
DB02	27.00	184.0	29.00	159.0	55.50	28.60	54.50	10.10	54.60	8.68	20.40	2.29	10.70	1.04	645.41	2.98	1.81	1.57	1.43
DB03	25.70	188.0	29.10	149.0	54.10	27.30	54.10	9.73	53.50	8.57	19.90	2.28	10.70	1.07	633.05	2.96	1.72	1.53	1.48
DB05	8.75	18.2	2.75	11.5	3.66	0.90	4.94	0.86	5.12	0.93	2.62	0.38	2.31	0.33	63.25	2.62	2.72	0.65	0.90
DB07	215.00	398.0	49.90	161.0	26.00	3.67	25.40	2.75	10.80	1.79	5.33	0.64	3.67	0.52	904.47	16.77	42.02	0.43	0.91

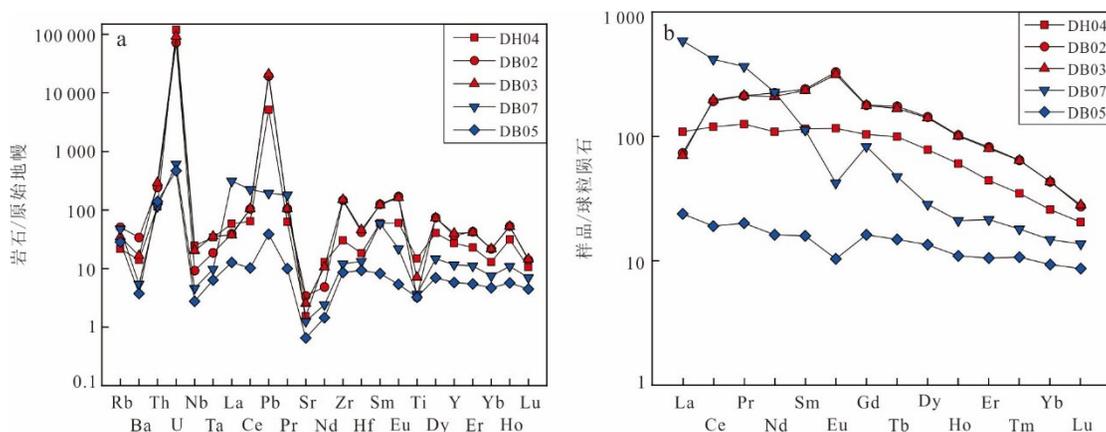


图 3 芭蕉箐 1841 铀矿化区钠长岩微量元素蛛网图(a)与稀土元素分布型式(b)(据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.3 Spider map of trace elements (a) and ree distribution pattern (b) of albite in Bajiaojing 1841 uranium mineralization area (modified after Sun and McDonough, 1989)

25.5) Ma 之间 .23 个测点在谐和图(图 4a)上主要分为 2 个集中区,一个集中区的加权平均年龄为 (1 877±13) Ma;另一个集中区的加权平均年龄为

(2 333±6.9) Ma. 除以上两组集中的年龄数据之外,还有部分数据稍偏离谐和线,反映部分锆石可能存在一定程度的 Pb 丢失,表明这些锆石来自于其

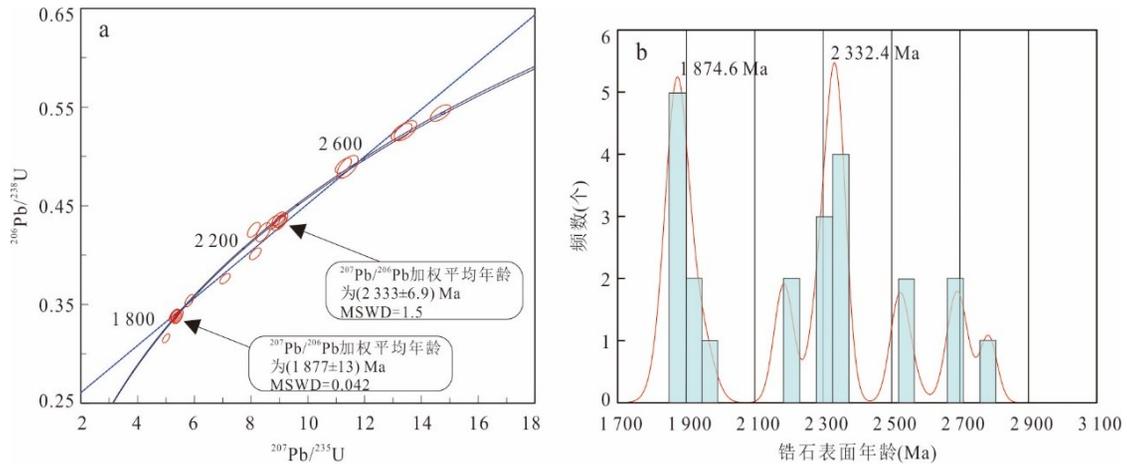


图4 样品DH01锆石U-Pb年龄谐和图(a)与年龄直方图(b)

Fig.4 Zircon U-Pb age concordance diagram (a) and age histogram (b) of sample DH01

表 4 交代钠长岩 DH01 锆石 U-Pb 同位素 LA-ICPMS

Table 4 Zircon U-Pb isotope LA-ICPMS of metasomatic albite DH01

测点号	含量( $10^{-6}$ )		同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度	Th/U
	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$		
DH01-01	112.73	444.57	0.14	0.002	7.08	0.119	0.38	0.003	1876.9	27.8	1820.2	14.2	1768.7	14.8	96%	0.25
DH01-02	259.61	427.82	0.24	0.004	13.87	0.388	0.42	0.009	3088.6	24.4	2741.0	26.6	2271.5	41.8	81%	0.51
DH01-03	233.19	317.45	0.11	0.002	5.01	0.084	0.32	0.003	1901.9	39.4	1882.3	17.2	1869.0	17.9	97%	0.73
DH01-05	234.42	456.47	0.15	0.002	8.15	0.134	0.40	0.004	1879.6	27.0	1875.7	16.9	1872.9	17.2	96%	0.51
DH01-06	182.57	269.52	0.15	0.002	8.78	0.160	0.43	0.005	1898.2	30.9	1892.1	16.5	1875.4	21.5	99%	0.68
DH01-07	78.85	93.04	0.12	0.002	5.38	0.108	0.34	0.004	1901.9	39.4	1882.3	17.2	1869.0	17.9	99%	0.85
DH01-08	77.70	108.08	0.11	0.002	5.29	0.119	0.34	0.004	1854.0	41.2	1867.7	19.2	1880.9	20.4	99%	0.72
DH01-09	303.20	231.72	0.11	0.002	5.34	0.105	0.34	0.004	1879.6	27.0	1875.7	16.9	1872.9	17.2	99%	1.31
DH01-10	237.26	155.15	0.11	0.002	5.31	0.106	0.34	0.004	1854.0	31.5	1870.9	17.1	1884.4	18.0	99%	1.53
DH01-11	127.18	267.35	0.15	0.002	8.99	0.168	0.43	0.005	2180.6	27.8	2121.6	15.0	2057.9	16.0	99%	0.48
DH01-12	178.54	220.29	0.11	0.002	5.30	0.090	0.34	0.003	1854.0	29.2	1868.9	14.5	1882.8	16.2	99%	0.81
DH01-13	76.62	184.84	0.17	0.003	11.25	0.189	0.49	0.005	2283.3	28.1	2278.4	18.1	2275.4	29.2	98%	0.41
DH01-14	105.39	188.86	0.12	0.002	5.82	0.103	0.35	0.004	2190.7	28.2	2241.5	16.6	2286.2	22.8	99%	0.56
DH01-15	304.42	457.28	0.14	0.002	8.43	0.167	0.42	0.006	2352.8	27.5	2336.6	17.2	2315.3	21.5	99%	0.67
DH01-16	163.96	286.41	0.19	0.003	13.44	0.262	0.53	0.007	2309.3	31.6	2315.1	16.7	2319.0	20.6	99%	0.57
DH01-17	174.21	161.88	0.18	0.003	13.30	0.241	0.53	0.006	2339.8	25.3	2337.7	14.1	2325.6	18.4	99%	1.08
DH01-18	136.12	274.35	0.15	0.003	8.97	0.156	0.44	0.005	2347.8	25.6	2344.6	14.9	2330.5	21.2	99%	0.50
DH01-19	130.62	269.82	0.19	0.003	14.68	0.237	0.54	0.005	2329.3	29.3	2334.9	16.0	2335.9	20.7	99%	0.48
DH01-20	206.31	335.00	0.15	0.002	9.00	0.137	0.43	0.004	2538.9	33.3	2556.5	20.2	2568.7	33.0	99%	0.62
DH01-21	114.50	241.79	0.15	0.002	9.07	0.147	0.44	0.005	2520.1	26.1	2544.3	15.8	2573.9	21.7	99%	0.47
DH01-22	94.97	152.15	0.14	0.002	8.09	0.148	0.43	0.005	2684.9	29.9	2701.2	17.2	2720.5	24.3	98%	0.62
DH01-23	119.80	227.31	0.12	0.002	5.45	0.104	0.34	0.004	1898.2	30.9	1892.1	16.5	1875.4	21.5	99%	0.53
DH01-24	73.25	103.01	0.17	0.003	11.40	0.246	0.49	0.008	2783.0	25.5	2794.6	15.5	2800.3	23.0	99%	0.71

他物源区或是后期受到了地质事件的改造.此外,还有5个大于2500 Ma的年龄数据,暗示扬子陆块西缘存在太古宙结晶基底.从锆石表面年龄直方图(图4b)可以看出,该样品的锆石年龄有2个明显的

峰值,一个峰值为1874.6 Ma,另一个峰值为2332.4 Ma,分别与图4a上的2组集中区相对应.

锆石的Th/U值能够在一定程度上反映锆石的成因环境,一般认为,岩浆锆石的Th/U值>0.1,而

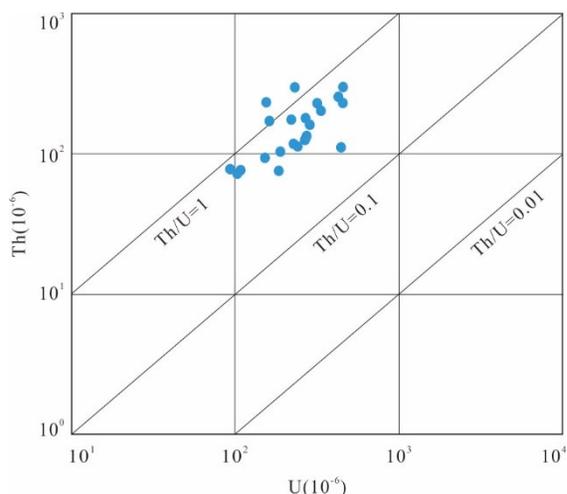


图 5 交代钠长岩 DH01 锆石 Th/U 比值 (据 Vavra *et al.*, 1999)

Fig.5 Zircon Th/U ratio of metasomatic albite DH01 (modified after Vavra *et al.*, 1999)

变质锆石的 Th/U 值 < 0.1 (朱华平等, 2011). 该样品 Th/U 比值在 0.25~1.53 之间, U、Th 之间具有正相关关系 (图 5), 反映了岩浆成因锆石的特点.

DH01 的锆石阴极发光 (CL) 图像及  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄 ( $1\sigma$ ) 如图 6 所示, 所有锆石均呈透明的半自形

或者自形晶体, 长 50~100  $\mu\text{m}$ , 部分锆石可见明显的环带特征, 表明这些锆石为岩浆成因, 另外少数锆石 CL 图像具有变质成因锆石的特征, 表明其后期可能受到了高温变质活动的影响.

**3.2.2 样品 DB02** 在岩浆钠长岩样品 DB02 选取 35 颗锆石进行测年分析 (表 5), 所有测点大部分位于谐和线上或附近 (图 7a), 集中分布在 1 800 Ma 谐和曲线点上, 个别测点偏离谐和线, 有明显的铅丢失. 集中区的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄为  $(1\ 743 \pm 53)$  Ma, MSWD=0.77, 与交代钠长岩样品 DH01 中的一组年龄数据在误差范围内较为接近. 从锆石表面年龄直方图 (图 7b) 可以看出, 此样品的锆石具有 2 个明显的峰值, 最突出的一个峰值为 1 848 Ma, 另一个突出的峰值为 1 761.2 Ma, 2 个峰值均在 1 800 Ma 左右, 与集中区的加权平均年龄相近并与样品 DH01 中的 1 874.6 Ma 峰值一致. 该样品 Th/U 比值在 0.10~2.45 之间 (图 8), 为岩浆成因锆石. 样品 DB02 的阴极发光 (CL) 图像及  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄 ( $1\sigma$ ) 如图 9 所示, 锆石多呈自形-半自形结构, 少部分为半自形短柱状以及不规则状, 颗粒大小介于 30~100  $\mu\text{m}$ , 根据其自形程度与内部结构来看, 主要有继承锆石、岩浆锆石、变质锆石与热液锆石.

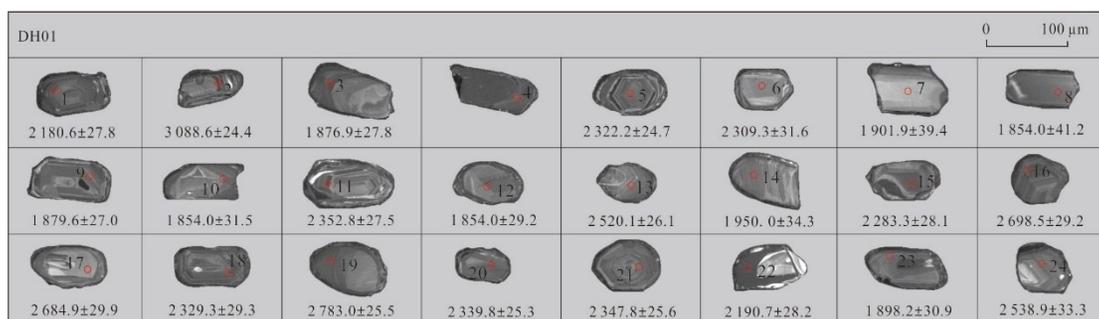


图 6 交代钠长岩 DH01 中锆石阴极发光照片和年龄 (Ma)

Fig.6 Cathodoluminescent (CL) images and age (Ma) of metasomatic albite DH01

表 5 岩浆钠长岩 DB02 锆石 U-Pb 同位素 LA-ICPMS

Table 5 Zircon U-Pb isotope LA-ICPMS of magmatic albite DB02

测点号	含量 ( $10^{-6}$ )			Th/ U	同位素比值						年龄 (Ma)						谐和度
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
					$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$					
DB02-01	25.7	232.0	238.0	0.97	0.136	0.001 8	6.802	0.144	0.361	0.006 8	2 181.2	22.5	2 086.0	18.8	1 988.6	32.4	95%
DB02-02	47.1	17.0	56.6	0.30	0.111	0.001 2	4.936	0.069	0.323	0.004 2	1 813.0	19.6	1 808.5	11.8	1 805.6	20.5	99%
DB02-03	30.9	84.9	89.9	0.94	0.106	0.001 8	3.821	0.185	0.257	0.010 9	1 736.1	31.5	1 597.3	39.0	1 472.5	56.0	91%
DB02-04	88.1	48.9	109.0	0.45	0.113	0.001 0	3.555	0.071	0.227	0.004 2	1 850.0	15.7	1 539.5	15.8	1 321.3	21.8	84%

续表 5

测点号	含量( $10^{-6}$ )			Th/ U	同位素比值						年龄(Ma)						谐 和 度
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$1\sigma$	
DB02-05	150.1	86.4	315.1	0.27	0.168	0.003 0	5.503	0.403	0.231	0.014 7	2 538.9	29.6	1 901.1	63.0	1 338.8	77.1	65%
DB02-06	188.6	182.4	446.0	0.41	0.141	0.001 8	7.959	0.217	0.415	0.013 7	2 243.5	21.9	2 226.4	24.6	2 239.1	62.2	99%
DB02-07	121.6	177.7	394.5	0.45	0.114	0.001 2	4.890	0.062	0.311	0.004 2	1 864.8	13.9	1 800.5	10.8	1 745.7	20.7	96%
DB02-08	128.1	37.2	356.8	0.10	0.107	0.001 1	4.676	0.078	0.315	0.004 8	1 766.7	18.4	1 763.0	14.0	1 767.0	23.7	99%
DB02-09	119.8	131.0	326.9	0.40	0.108	0.001 5	4.661	0.140	0.314	0.010 7	1 773.2	25.2	1 760.3	25.1	1 762.7	52.4	99%
DB02-10	89.2	258.0	236.8	1.09	0.114	0.001 0	5.252	0.072	0.335	0.004 7	1 862.0	15.7	1 861.1	11.8	1 860.9	22.6	99%
DB02-11	153.7	70.5	217.6	0.32	0.112	0.001 1	5.033	0.273	0.328	0.017 4	1 825.6	16.8	1 824.8	45.9	1 828.8	84.4	99%
DB02-12	200.0	395.7	272.3	1.45	0.167	0.004 3	10.092	1.082	0.477	0.063 4	2 532.4	44.0	2 443.3	99.1	2 514.5	276.6	97%
DB02-13	104.0	217.9	585.2	0.37	0.098	0.002 6	3.704	0.447	0.272	0.032 3	1 577.5	48.9	1 572.2	96.4	1 552.2	163.6	98%
DB02-14	212.2	477.6	560.1	0.85	0.103	0.002 3	3.985	0.379	0.293	0.033 1	1 680.6	41.2	1 631.1	77.3	1 657.6	164.9	98%
DB02-15	90.0	163.2	952.7	0.17	0.091	0.001 9	2.915	0.369	0.252	0.035 8	1 455.6	39.4	1 385.7	95.8	1 448.2	184.3	95%
DB02-16	116.3	143.7	484.3	0.30	0.103	0.001 9	4.063	0.299	0.292	0.021 3	1 677.5	39.8	1 646.9	60.0	1 653.0	106.3	99%
DB02-17	161.5	119.2	407.9	0.29	0.126	0.002 6	6.429	0.324	0.382	0.025 3	2 038.9	4.6	2 036.3	44.3	2 084.7	118.2	97%
DB02-18	169.2	136.6	415.0	0.33	0.117	0.002 3	5.536	0.345	0.347	0.027 0	1 916.7	34.9	1 906.2	53.6	1 919.2	129.3	99%
DB02-19	147.7	165.7	422.4	0.39	0.105	0.001 6	4.405	0.199	0.310	0.018 6	1 718.2	23.1	1 713.3	37.5	1 738.9	91.8	98%
DB02-20	98.3	190.4	426.7	0.45	0.123	0.002 8	4.071	0.218	0.238	0.013 7	2 005.9	45.2	1 648.6	43.8	1 377.6	71.3	82%
DB02-21	115.0	123.6	303.1	0.41	0.139	0.002 3	3.126	0.139	0.166	0.008 5	2 220.7	28.9	1 439.1	34.3	989.8	47.0	63%
DB02-22	182.4	195.1	462.8	0.42	0.144	0.002 4	7.714	1.116	0.420	0.066 9	2 270.1	27.9	2 198.3	130.0	2 261.0	303.8	97%
DB02-23	79.9	294.6	812.6	0.36	0.105	0.001 6	4.409	0.094	0.306	0.005 6	1 710.8	27.9	1 714.1	17.7	1 718.9	27.6	99%
DB02-24	156.6	122.1	183.4	0.67	0.106	0.002 3	4.420	0.118	0.308	0.009 5	1 733.0	38.9	1 716.2	22.0	1 729.9	46.8	99%
DB02-25	70.9	134.6	463.8	0.29	0.058	0.001 2	0.634	0.051	0.079	0.006 1	531.5	46.3	498.9	31.7	492.0	36.5	98%
DB02-26	53.0	829.7	579.9	1.43	0.109	0.001 8	4.067	0.096	0.271	0.005 5	1 781.2	29.6	1 647.8	19.3	1 543.7	27.9	93%
DB02-27	73.9	101.4	122.5	0.83	0.110	0.001 6	3.676	0.121	0.240	0.006 5	1 802.2	25.8	1 566.2	26.4	1 388.0	33.8	87%
DB02-28	49.1	96.7	225.3	0.43	0.112	0.001 6	4.455	0.143	0.287	0.007 9	1 825.6	25.3	1 722.6	26.6	1 625.6	39.4	94%
DB02-29	9.8	47.5	151.0	0.31	0.054	0.001 4	0.377	0.020	0.050	0.001 7	390.8	62.0	325.0	14.6	311.8	10.5	95%
DB02-30	58.3	81.4	153.4	0.53	0.058	0.000 8	0.510	0.008	0.064	0.000 7	522.3	31.5	418.7	5.7	401.3	4.3	95%
DB02-31	92.4	512.9	636.5	0.81	0.107	0.001 3	3.443	0.172	0.231	0.011 2	1 749.7	22.1	1 514.2	39.4	1 341.7	58.4	87%
DB02-32	31.0	120.3	317.0	0.38	0.055	0.001 2	0.310	0.019	0.040	0.001 5	413.0	48.1	274.6	14.8	251.2	9.6	91%
DB02-33	103.4	386.1	649.0	0.60	0.098	0.003 9	2.094	0.185	0.138	0.009 3	1 588.9	74.4	1 146.9	60.6	832.2	52.7	68%
DB02-34	119.0	135.4	1 080.2	0.13	0.112	0.001 4	5.042	0.083	0.327	0.005 6	1 832.4	22.2	1 826.3	14.1	1 822.5	27.3	99%
DB02-35	98.2	344.5	140.6	2.45	0.156	0.006 4	7.922	1.417	0.446	0.085 0	2 416.7	68.7	2 222.2	161.3	2 376.7	378.8	93%

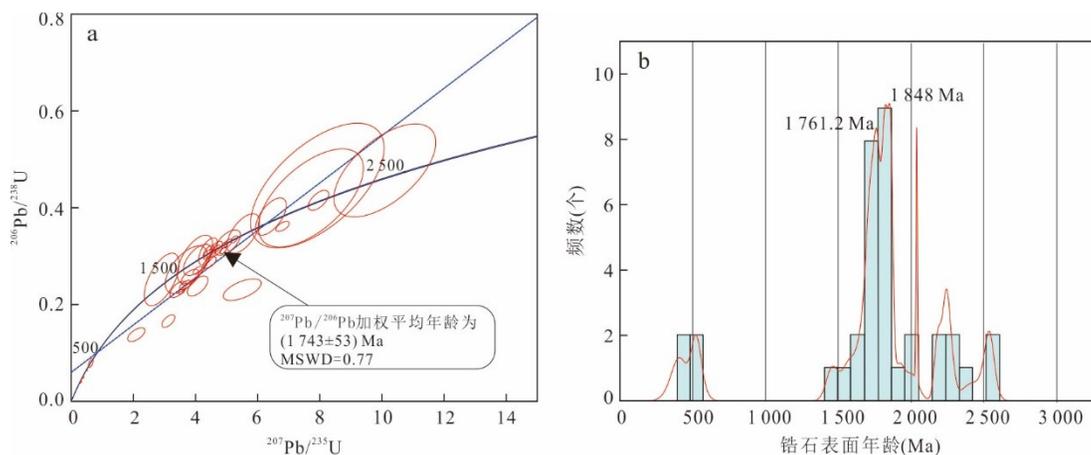


图 7 样品 DB02 锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)和年龄直方图(b)

Fig.7 Zircon U-Pb age concordance diagram (a) and age histogram (b) of sample DB02

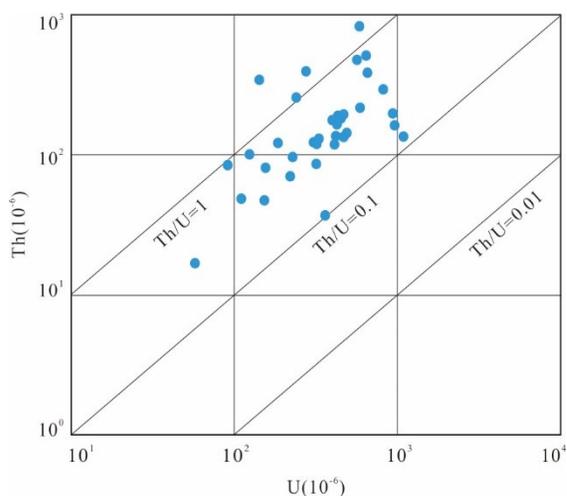


图 8 岩浆钠长岩 DB02 锆石 Th/U 比值(据 Vavra *et al.*, 1999)

Fig.8 Zircon Th/U ratio of magmatic albite DB02 (modified after Vavra *et al.*, 1999)

## 4 讨论

### 4.1 岩石成因

根据野外岩石特征,该地区的钠长岩分为岩浆钠长岩与交代钠长岩,钠长岩锆石样品 Th/U 比值均大于 0.1,证明该地区钠长岩具有岩浆成因特征,且钠质岩浆结晶分异所携带的岩浆热液同时交代围岩形成交代钠长岩.在钠长岩样品中,笔者发现有大量柱状电气石(图 2d)存在,且钠长岩锆石形态多样,表明其后期可能受高温热液活动的改造.

岩浆钠长岩中的  $\Sigma\text{REE}$  均值为  $551.9 \times 10^{-6}$ ,轻重稀土元素分异程度较低,交代钠长岩中由于样品 DB07 的轻稀土元素过于异常笔者暂不

考虑,样品 DB05 的  $\Sigma\text{REE}$  值为  $63.25 \times 10^{-6}$ ,暗示本区钠交代过程中伴随着稀土元素的迁出.这与赵如意(2016)研究的钠交代型铀矿床中的钠长石化岩石稀土元素变化特征相似.

根据 Wright (1969) 提出的 AR-SiO<sub>2</sub> 岩浆系列分类图(图 10),岩浆钠长岩落入碱性系列范围,表明其形成于拉张的构造环境且具有幔源特征(涂光焱, 1989).在钠长岩 Yb+Ta-Rb 构造环境判别图(图 11)中,岩浆钠长岩落在板内花岗岩(WPB)区域,说明岩浆钠长岩形成于板内环境(Pearce *et al.*, 1984).

高场强元素是判断岩石来源的重要指标之一.岩浆钠长岩 Nb/Ta 的比值在 8.64~12.59 之间,平均值为 10.37,接近于大陆地壳的 Nb/Ta 比值(11~12),而低于原始地幔(17.4±0.5)与亏损地幔(15.5±1)的比值(Taylor and McLennan, 1985; Jochum, 1996).Mg<sup>#</sup> 是判断岩体来自于地壳还是地幔熔体的重要依据之一,芭蕉箐地区岩浆钠长岩的 Mg<sup>#</sup> 在 19.59~39.28 之间,平均值为 30.34,表明岩体主要为下地壳部分熔融形成(Rapp *et al.*, 1999).结合其碱性岩石特征,表明其源区主要为下地壳且有幔源物质的加入.

Chappell and White (1992) 认为, CaO/Na<sub>2</sub>O 的比值能够判断钠长岩的源区成分,当 CaO/Na<sub>2</sub>O > 0.3 时,源区原岩的基性程度较高或富含黑云母; CaO/Na<sub>2</sub>O < 0.3 时,源区为泥质原岩或富含白云母,而芭蕉箐地区钠长岩 CaO/Na<sub>2</sub>O 比值为 0.05~0.19,表明其钠长岩源区物质主要为泥质原岩.通过建立 A/MF-C/MF 源区判别图解(图 12),发现该地区岩浆钠长岩

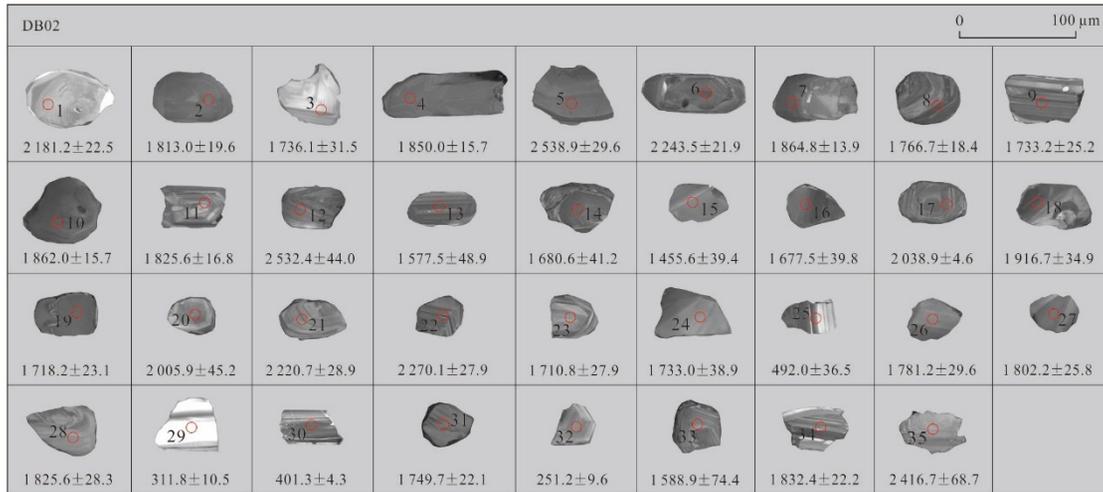


图 9 岩浆钠长岩 DB02 中锆石阴极发光照片和年龄 (Ma)

Fig.9 Cathodoluminescent (CL) images and age (Ma) of magmatic albite DB02

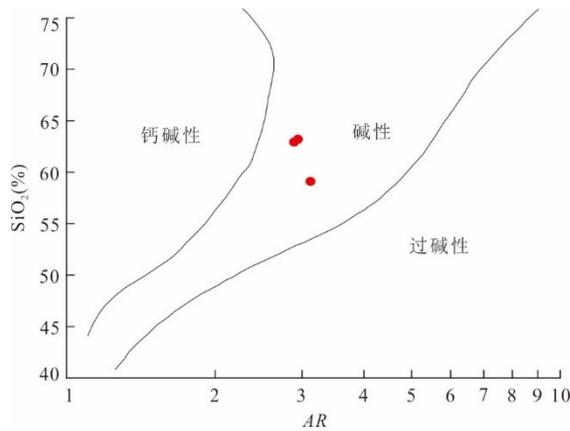


图 10 芭蕉箐地区岩浆钠长岩 AR-SiO<sub>2</sub> 判别图解 (底图据 Wright, 1969)

Fig.10 AR vs SiO<sub>2</sub> diagram for classification of magmatic albite in Bajiaojing (modified after Wright, 1969)

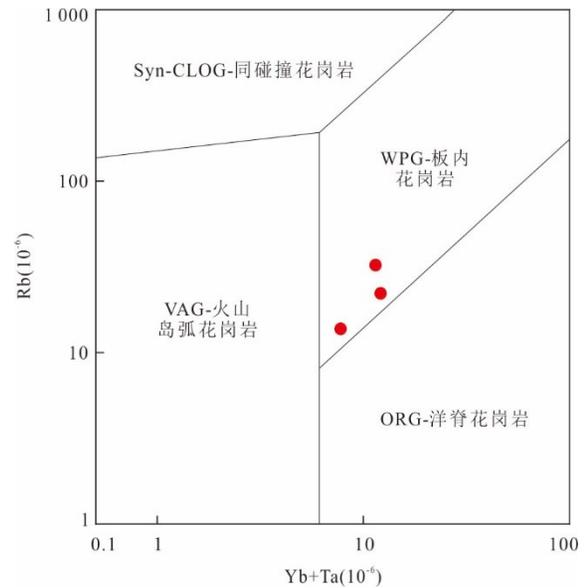


图 11 岩浆钠长岩 Yb+Ta-Rb 构造环境判别图 (底图据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig.11 Yb+Ta-Rb discrimination diagram of tectonic setting for magmatic albite (modified after Pearce *et al.*, 1984)

样品全部落入变质泥岩部分熔融区域。

综合上述分析,芭蕉箐 1841 铀矿化区钠长岩形成于板内拉张构造环境,岩体源自下地壳变质泥岩部分熔融且有幔源物质混入。

#### 4.2 芭蕉箐地区钠长岩对扬子地台西南缘岩浆活动的启示

扬子地台是华南陆块重要的克拉通陆块之一,其西南缘的岩浆活动在古元古代表现较为强烈,主要集中在 2.3 Ga 与 1.8~1.0 Ga 两期(肖剑等, 2021)。普遍认为,扬子陆块西南缘古元古代中晚期的岩浆活动最为强烈,主要在康滇地轴地区,集中在 1 750~1 650 Ma(关俊雷等, 2011;耿元生等, 2012;王生伟等, 2014;王伟等, 2019)。近年来,有关扬子地台西南缘古元古代早期岩浆活动的报道也

越来越多,例如:越南西北部 Phan Si Pan 杂岩中 2 280~2 190 Ma 的花岗质片麻岩(Wang *et al.*, 2016)、我国云南撮科地区~2 360 Ma 的二长花岗岩(Cui *et al.*, 2019)、云南东川地区 2 285 Ma 与 2 317 Ma 的凝灰岩(朱华平等, 2011;周邦国等, 2012)等。崔晓庄(2020)认为扬子陆块西南缘在 2.4~2.3 Ga 期间发生了一次碰撞事件, 1.86~1.83 Ga 期间经历了变质作用与同碰撞花岗质岩浆作用。本次在芭蕉箐 1841 铀矿化区所取得的钠长岩

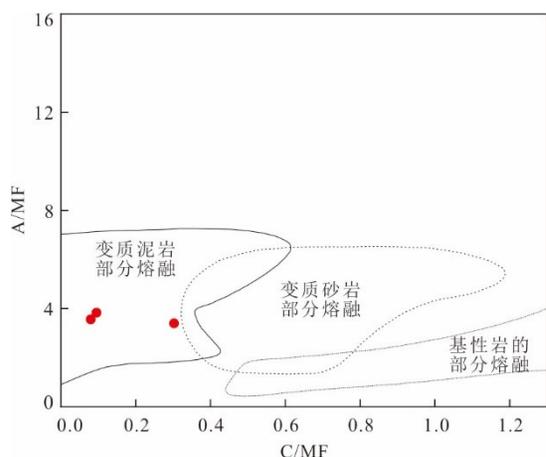


图12 芭蕉箐地区钠长岩A/MF-C/MF源区判别图解(底图据 Altherr *et al.*, 2000)

Fig.12 Distinguishing diagram of A/MF-C/MF source area of albite in Bashojing (modified after Altherr *et al.*, 2000)

A/MF:  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO})$ ; C/MF:  $\text{CaO}/(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO})$

样品中,其表面年龄(图4b、7b)的峰值主要分布在2.33 Ga、1.87 Ga、1.85 Ga及1.76 Ga,与上文所述的两次热事件相对应,结合前文地球化学数据,暗示该区钠长岩原岩的形成可能与古元古代早期碰撞事件有关,并且在古元古代中晚期经历了较为强烈的钠长质岩浆作用。笔者推断此时钠长质岩浆沿着断裂带上涌并熔融富U碳质板岩(待发表),使其成为富U岩浆,这些岩浆在断裂附近的裂隙中侵入形成含矿钠长岩脉,同时大量的含U钠质岩浆期后热液随岩浆活动涌出并交代围岩,形成含矿的交代钠长岩。

扬子陆块西南缘存在着大量古元古代中晚期的岩脉岩墙,如云南东川地区因民组1.7 Ga左右的辉绿岩(王冬兵等,2013)、云南地区大红山群约1.6 Ga的火山岩(Zhao *et al.*, 2011)、四川会理地区报道的约1.7 Ga左右的辉长岩及1.5~1.8 Ga的火山岩等(尹福光等,2012),这表明该地区在古元古代中晚期广泛发育岩浆活动,本次所获得的钠长岩样品即为该时期众多岩浆活动的产物之一。自20世纪90年代以来,人们在扬子地台西南缘陆续发现了众多的铀矿点,如牟定1101、易门2801、攀枝花505、米易108铀矿点等(武勇等,2020),但胥德恩(1992)总结该地区的铀矿物同位素年龄数据时发现,铀矿化主要集中在5个时期且均小于1.0 Ga,本次芭蕉箐1841铀矿化区取得的两种富铀钠长岩其形成时代为

1.8 Ga左右,是首次在康滇地轴发现形成于古元古代中晚期的铀矿化区,这对于该地区铀矿成矿作用的研究及铀矿的成矿年代学研究具有重要意义。

2.4 Ga以前,扬子陆块与劳伦西亚大陆是两个相互独立的块体,在古元古代早期(2.4~2.3 Ga)扬子陆块作为一个外来陆块在Arrow-smith造山作用时期增生到劳伦西亚的Rea克拉通,此时扬子陆块西南缘也发生了碰撞事件及多次增生事件。2.0 Ga左右,扬子陆块东西部相互碰撞并固化,而Rea克拉通与Slave克拉通在~1.97 Ga发生了碰撞事件,三者之间的联系不言而喻,这也暗示了扬子陆块与劳伦西亚、西伯利亚大陆共同参与了Columbia超大陆的聚合(Wang *et al.*, 2016)。在整个Columbia超大陆聚合期间(2.1~1.8G),全球范围内发生了大规模的碰撞造山事件(王伟等,2019)。特别是在2.05~1.85 Ga期间,由于强烈的碰撞活动,扬子陆块经历了广泛的岩浆与变质作用,导致离散的太古宙基底汇聚成一个统一的陆块。本文所报道的两种钠长岩样品的年代学与地球化学数据,为进一步证实扬子陆块参与Columbia超大陆聚合提供了新的证据,反映了其为Columbia超大陆聚合事件在扬子地台西南缘的地质响应。

## 5 结论

(1)四川芭蕉箐地区1841铀矿化点有两类钠长岩:岩浆钠长岩和交代钠长岩。钠长岩岩石地球化学研究表明,岩浆钠长岩较交代钠长岩极富U、Pb元素,整体上两种钠长岩相对富集Th、U、Zr、Sm、REE等元素,相对贫Ba、K、Sr、Rb、Nb、Ti等元素。

(2)钠长岩年代学特征表明,两种钠长岩的年龄分布范围均较大,交代钠长岩的年龄共有两组集中区,加权平均年龄分别为(1 877±13) Ma、(2 333±6.9) Ma,岩浆钠长岩年龄只有一组集中区,加权平均年龄为(1 743±53) Ma。

(3)岩浆钠长岩形成于陆内拉张构造环境,岩体源区主要来自下地壳的变质泥岩熔融,且有幔源物质的加入。

(4)结合前人在本地区岩浆-变质事件的研究成果,发现钠长岩原岩可能形成于扬子地台西南缘在古元古代早期发生的碰撞事件,并且在古元古代中晚期的岩浆作用中形成岩浆钠长岩与交代钠长岩,这次岩浆作用也是造成铀元

素大量富集的原因. 本区钠长岩所记录的两次岩浆事件是全球 Columbia 超大陆聚合事件在扬子西南缘的地质记录, 为扬子地台在 Columbia 超大陆重建中的位置提供了新的制约.

致谢: 感谢匿名审稿专家提供的有益建议!

## References

- Altherr, R., Holl, A., Hegner, E., et al., 2000. High-Potassium, Calc-Alkaline I-Type Plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and Northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50(1-3): 51-73. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(99\)00052-3](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(99)00052-3)
- Chappell, B. M., White, A. J. R., 1992. I- and S-Type Granites in the Lachlan Fold Belt. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 83(1-2): 1-26. <https://doi.org/10.1017/S0263593300007720>
- Cui, X. Z., 2020. Precambrian Tectonic Evolution of the Southwestern Yangtze Block and Its Response to the Supercontinent Cycle (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Cui, X. Z., Wang, J., Sun, Z. M., et al., 2019. Early Paleoproterozoic (Ca. 2.36 Ga) Post-Collisional Granitoids in Yunnan, SW China: Implications for Linkage between Yangtze and Laurentia in the Columbia Supercontinent. *Journal of Asian Earth Sciences*, 169: 308-322. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2018.10.026>
- Deng, Q., Wang, Z. J., Ren, G. M., et al., 2020. Identification of the -2.09 Ga and -1.76 Ga Granitoids in the Northwestern Yangtze Block: Records of the Assembly and Break-Up of Columbia Supercontinent. *Earth Science*, 45(9): 3295-3312 (in Chinese with English abstract).
- Geng, Y. S., Kuang, H. W., Liu, Y. Q., et al., 2017. Subdivision and Correlation of the Mesoproterozoic Stratigraphy in the Western and Northern Margins of Yangtze Block. *Acta Geologica Sinica*, 91(10): 2151-2174 (in Chinese with English abstract).
- Geng, Y. S., Liu, Y. Q., Gao, L. Z., et al., 2012. Geochronology of the Mesoproterozoic Tong'an Formation in Southwestern Margin of Yangtze Craton: New Evidence from Zircon LA-ICP-MS U-Pb Ages. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1479-1490 (in Chinese with English abstract).
- Guan, J. L., Zheng, L. L., Liu, J. H., et al., 2011. Zircons SHRIMP U-Pb Dating of Diabase from Hekou, Sichuan Province, China and Its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 85(4): 482-490 (in Chinese with English abstract).
- Han, Q. S., Peng, S. B., Kusky, T. M., et al., 2017. A Paleoproterozoic Ophiolitic Mélange, Yangtze Craton, South China: Evidence for Paleoproterozoic Suturing and Microcontinent Amalgamation. *Precambrian Research*, 293: 13-38. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.03.004>
- Hu, R. Z., Tao, Y., Zhong, H., et al., 2005. Mineralization Systems of a Mantle Plume: A Case Study from the Emeishan Igneous Province, Southwest China. *Earth Science Frontiers*, 12(1): 42-54 (in Chinese with English abstract).
- Jochum, K. P., 1996. Rhodium and other Platinum-Group Elements in Carbonaceous Chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(17): 3353-3357. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00186-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00186-X)
- Li, T., Xu, Z. Q., Song, H., et al., 2021. Characteristics of Uranium Mineralization in Bajiaoqing Area, Huili, Sichuan. *Uranium Geology*, 37(2): 205-215 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. T., Ding, J., Qin, J. H., et al., 2010. Status of Copper Resources in Southwestern China and Suggestion on Prospecting. *Geological Bulletin of China*, 29(9): 1371-1382 (in Chinese with English abstract).
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956-983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Qiu, X. F., Yang, H. M., Zhao, X. M., et al., 2019. Neoproterozoic Granitic Gneisses in the Kongling Complex, Yangtze Craton: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Earth Science*, 44(2): 415-426 (in Chinese with English abstract).
- Rapp, R. P., Shimizu, N., Norman, M. D., et al., 1999. Reaction between Slab-Derived Melts and Peridotite in the Mantle Wedge: Experimental Constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160(4): 335-356. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00106-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00106-0)
- Rogers, J. J. W., Santosh, M., 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic Supercontinent. *Gondwana Research*, 5(1): 5-22. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70883-2](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70883-2)
- Song, H., 2014. Precambrian Copper-Iron-Gold-Uranium Polymetallic Deposits and Their Regional Metallogeny in Southwestern Margin of Yangtze Block (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).

- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Tu, G. C., 1989. On The Alkali-Rich Intrusive Rocks. *Mineral Resources and Geology*, 3(3): 1–4, 16 (in Chinese with English abstract).
- Vavra, G., Schmid, R., Gebauer, D., 1999. Internal Morphology, Habit and U-Th-Pb Microanalysis of Amphibolite-to-Granulite Facies Zircons: Geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(4): 380–404. <https://doi.org/10.1007/s004100050492>
- Wang, D. B., Yin, F. G., Sun, Z. M., et al., 2013. Zircon U-Pb Age and Hf Isotope of Paleoproterozoic Mafic Intrusion on the Western Margin of the Yangtze Block and Their Implications. *Geological Bulletin of China*, 32(4): 617–630 (in Chinese with English abstract).
- Wang, K., Dong, S. W., 2019. New Insights into Paleoproterozoic Tectonics of the Yangtze Block in the Context of Early Nuna Assembly: Possible Collisional Granitic Magmatism in the Zhongxiang Complex, South China. *Precambrian Research*, 334: 105452. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105452>
- Wang, S. W., Liao, Z. W., Sun, X. M., et al., 2014. The Yanshanian Lithospheric Evolution in the Kangdian Area: Restriction from SHRIMP Zircons U-Pb Age and Geochemistry of Mafic Dykes in Dongchuan, Yunnan Province, SW China. *Acta Geologica Sinica*, 88(3): 299–317 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W., Cawood, P. A., Zhou, M. F., et al., 2016. Paleoproterozoic Magmatic and Metamorphic Events Link Yangtze to Northwest Laurentia in the Nuna Supercontinent. *Earth and Planetary Science Letters*, 433: 269–279. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.11.005>
- Wang, W., Lu, G. M., Huang, S. F., et al., 2019. Geological Evolution of the Yangtze Block in Paleo- to Mesoproterozoic and Its Implication on the Reconstruction of the Columbia Supercontinent. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 38(1): 30–52, 203 (in Chinese with English abstract).
- Wright, J. B., 1969. A Simple Alkalinity Ratio and Its Application to Questions of Non-Orogenic Granite Genesis. *Geological Magazine*, 106(4): 370–384. <https://doi.org/10.1017/s0016756800058222>
- Wu, Y., Qin, M. K., Guo, D. F., et al., 2020. Metallogenic Chronology of the Pitchblende of 1101 Uranium Ore Area in Mouding, Middle-South Part of the Kangdian Axis and Its Geological Significance. *Earth Science*, 45(2): 419–433 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, J., Zhao, Z. D., Zhu, X. Y., et al., 2021. Detrital Zircon Chronology and Element Geochemistry of the Dongchuan Group in Yunnan Province and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 37(4): 1270–1286 (in Chinese with English abstract).
- Xu, D. E., 1992. Geological Significance of the Age of U-Bearing Minerals on the Kangdian Axis. *Acta Geologica Sichuan*, 12(4): 329–333 (in Chinese with English abstract).
- Yin, F. G., Sun, Z. M., Ren, G. M., et al., 2012. Geological Record of Paleo- and Mesoproterozoic Orogenesis in the Western Margin of Upper Yangtze Block. *Acta Geologica Sinica*, 86(12): 1917–1932 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C. J., Chen, Y. L., Li, J. C., et al., 2015. The Discovery of Coarse-Grained Uraninite in Kangdian Axis and Its Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 34(12): 2219–2226 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, R. Y., 2016. Geological Characteristics and Mineralization of the Jiling Sodium Metasomatic Uranium Deposit in the Longshoushan Metallogenic Belt, Gansu Province (Dissertation). Chang'an University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. F., Zhou, M. F., 2011. Fe-Cu Deposits in the Kangdian Region, SW China: A Proterozoic IOCG (Iron-Oxide-Copper-Gold) Metallogenic Province. *Mineralium Deposita*, 46(7): 731–747. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0342-y>
- Zhou, B. G., Wang, S. W., Sun, X. M., et al., 2012. SHRIMP U-Pb Age and Its Significance of Zircons in Welded Tuff of Wangchang Formation in Dongchuan Area, Yunnan Province, SW China. *Geological Review*, 58(2): 359–368 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, H. P., Zhou, B. G., Wang, S. W., et al., 2011. Detrital Zircon U-Pb Dating by LA-ICP-MS and Its Geological Significance in Western Margin of Yangtze Terrane. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 31(1): 70–74 (in Chinese with English abstract).

#### 中文参考文献

崔晓庄, 2020. 扬子陆块西南缘前寒武纪构造演化及其对超

- 大陆旋回的响应(博士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 邓奇, 汪正江, 任光明, 等, 2020. 扬子地块西北缘~2.09 Ga 和~1.76 Ga 花岗质岩石: Columbia 超大陆聚合-裂解的岩浆记录. 地球科学, 45(9): 3295-3312.
- 耿元生, 旷红伟, 柳永清, 等, 2017. 扬子地块西、北缘中元古代地层的划分与对比. 地质学报, 91(10): 2151-2174.
- 耿元生, 柳永清, 高林志, 等, 2012. 扬子克拉通西南缘中元古代通安组的形成时代: 锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄. 地质学报, 86(9): 1479-1490.
- 关俊雷, 郑来林, 刘建辉, 等, 2011. 四川省会理县河口地区辉绿岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. 地质学报, 85(4): 482-490.
- 胡瑞忠, 陶琰, 钟宏, 等, 2005. 地幔柱成矿系统: 以峨眉山地幔柱为例. 地学前缘, 12(1): 42-54.
- 李涛, 徐争启, 宋昊, 等, 2021. 四川会理芭蕉箐地区铀矿化特征研究. 铀矿地质, 37(2): 205-215.
- 刘增铁, 丁俊, 秦建华, 等, 2010. 中国西南地区铜矿资源现状及对地质勘查工作的几点建议. 地质通报, 29(9): 1371-1382.
- 邱啸飞, 杨红梅, 赵小明, 等, 2019. 扬子克拉通崆岭杂岩新太古代花岗片麻岩成因及其构造意义. 地球科学, 44(2): 415-426.
- 宋昊, 2014. 扬子地块西南缘前寒武纪铜-铁-金-铀多金属矿床及区域成矿作用(博士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 涂光炽, 1989. 关于富碱侵入岩. 矿产与地质, 3(3): 1-4, 16.
- 王冬兵, 尹福光, 孙志明, 等, 2013. 扬子陆块西缘古元古代基性侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及其地质意义. 地质通报, 32(4): 617-630.
- 王生伟, 廖震文, 孙晓明, 等, 2014. 康滇地区燕山期岩石圈演化: 来自东川基性岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和地球化学制约. 地质学报, 88(3): 299-317.
- 王伟, 卢桂梅, 黄思访, 等, 2019. 扬子陆块古-中元古代地质演化与 Columbia 超大陆重建. 矿物岩石地球化学通报, 38(1): 30-52, 203.
- 武勇, 秦明宽, 郭冬发, 等, 2020. 康滇地轴中南段牟定 1101 铀矿区沥青铀矿成矿时代及成因. 地球科学, 45(2): 419-433.
- 肖剑, 赵志丹, 祝新友, 等, 2021. 云南东川群碎屑锆石年代学和元素地球化学及其地质意义. 岩石学报, 37(4): 1270-1286.
- 胥德恩, 1992. 康滇地轴铀矿物年龄的地质意义. 四川地质学报, 12(4): 329-333.
- 尹福光, 孙志明, 任光明, 等, 2012. 上扬子陆块西南缘早-中元古代造山运动的地质记录. 地质学报, 86(12): 1917-1932.
- 张成江, 陈友良, 李巨初, 等, 2015. 康滇地轴巨粒晶质铀矿的发现及其地质意义. 地质通报, 34(12): 2219-2226.
- 赵如意, 2016. 甘肃省龙首山成矿带茂岭钠交代型铀矿地质特征与成矿作用研究(博士学位论文). 西安: 长安大学.
- 周邦国, 王生伟, 孙晓明, 等, 2012. 云南东川望厂组熔结凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义. 地质论评, 58(2): 359-368.
- 朱华平, 周邦国, 王生伟, 等, 2011. 扬子地台西缘康滇克拉通中碎屑锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. 矿物岩石, 31(1): 70-74.