

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.05.08

引用格式: 曾勇, 刘一, 郭维民, 等. 巴西卡拉加斯地区变质基底的岩浆作用与构造演化[J]. 中国地质调查, 2023, 10(5): 57–70. (Zeng Y, Liu Y, Guo W M, et al. Magmatism and tectonic evolution of metamorphic basement in Carajás area of Brazil[J]. Geological Survey of China, 2023, 10(5): 57–70.)

巴西卡拉加斯地区变质基底的岩浆作用与构造演化

曾勇, 刘一, 郭维民, 沈莽庭, 徐鸣

(中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016)

摘要: 巴西卡拉加斯(Carajás)地区发育古老的太古宙变质基底, 是世界上矿床类型最丰富、资源聚集程度最高的成矿区之一。在太古宙花岗岩-绿岩为主体的结晶基底中, 含有大量紫苏花岗岩、奥长花岗岩-英云闪长岩-花岗闪长岩(trondhjemite-tonalite-granodiorite, TTG)岩套和未完全解体的变质深成岩, 目前对其认识仍存在较大分歧。岩浆岩的正确划分和精细研究是深入认识南美克拉通演化的重要手段, 在调查卡拉加斯地区基底中变质侵入岩的基础上, 结合前人资料将其进一步划分为中太古代的紫苏花岗岩、层状基性-超基性岩和TTG岩套, 新太古代的基性-超基性杂岩、TTG岩套、同构造花岗岩、后构造花岗岩等, 以及古元古代的碱性花岗岩。结合岩石学、地球化学和年代学方法综合分析了卡拉加斯地区的花岗质深成岩, 锆石U-Pb测年获得的花岗岩²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb表面年龄集中在2 899~2 831 Ma, 2 742~2 622 Ma和1 919 Ma 3个时期, 认为南美克拉通在经历了古太古代陆核形成、中太古代古大陆增生后, 在太古宙末期和古元古代发生了二阶段的克拉通化过程, 在中元古代-新元古代克拉通开始被破坏。通过对比南美克拉通与华北克拉通的早期演化过程, 推测南美克拉通的构造演化早期受地幔柱控制, 晚期转变为以板块构造为主导的大陆增生机制。研究有助于深入认识和对比矿集区成矿过程及其成矿效应。

关键词: 花岗岩; 岩浆作用; 构造演化; 巴西; 卡拉加斯地区

中图分类号: P681.7

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2023)05-0057-14

0 引言

卡拉加斯(Carajás)地区位于巴西亚马孙盆地的东南部边缘, 出露古老的太古宙变质基底, 是世界上矿床类型最丰富、资源聚集程度最高的成矿区之一。在太古宙花岗岩-绿岩地块的基底中, 含有大量未完全解体的奥长花岗岩-英云闪长岩-花岗闪长岩(trondhjemite-tonalite-granodiorite, TTG)岩套和变质深成岩侵入体, 其类型繁多、结构复杂、特征不一, 基底岩石及区域构造演化等科学问题引起了众多学者的关注^[1-3]。但由于对卡拉加斯地区基底岩浆岩系的组成、结构与时代等的调查研究不足, 大大限制了对该地区基底与构造

演化的认识。本文在已有研究的基础上^[4], 进一步调查了该地区变质基底中岩浆岩的基本特征, 利用构造-岩石填图方法划分基底中的变质深成岩体, 研究岩浆侵入作用, 并通过地球化学方法还原其岩石的物质来源和结晶过程, 用LA-ICP-MS锆石U-Pb测年获得了一批新的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb同位素年龄数据, 建立了其变质深成岩的年代序列, 并进一步总结了卡拉加斯地区构造岩浆演化的规律, 探讨了古老克拉通在太古宙-元古宙的岩石圈减薄与破坏作用的发生与演化。

1 区域地质背景

卡拉加斯地区由北部Itacaiúnas剪切带

收稿日期: 2022-09-22; 修订日期: 2023-03-15。

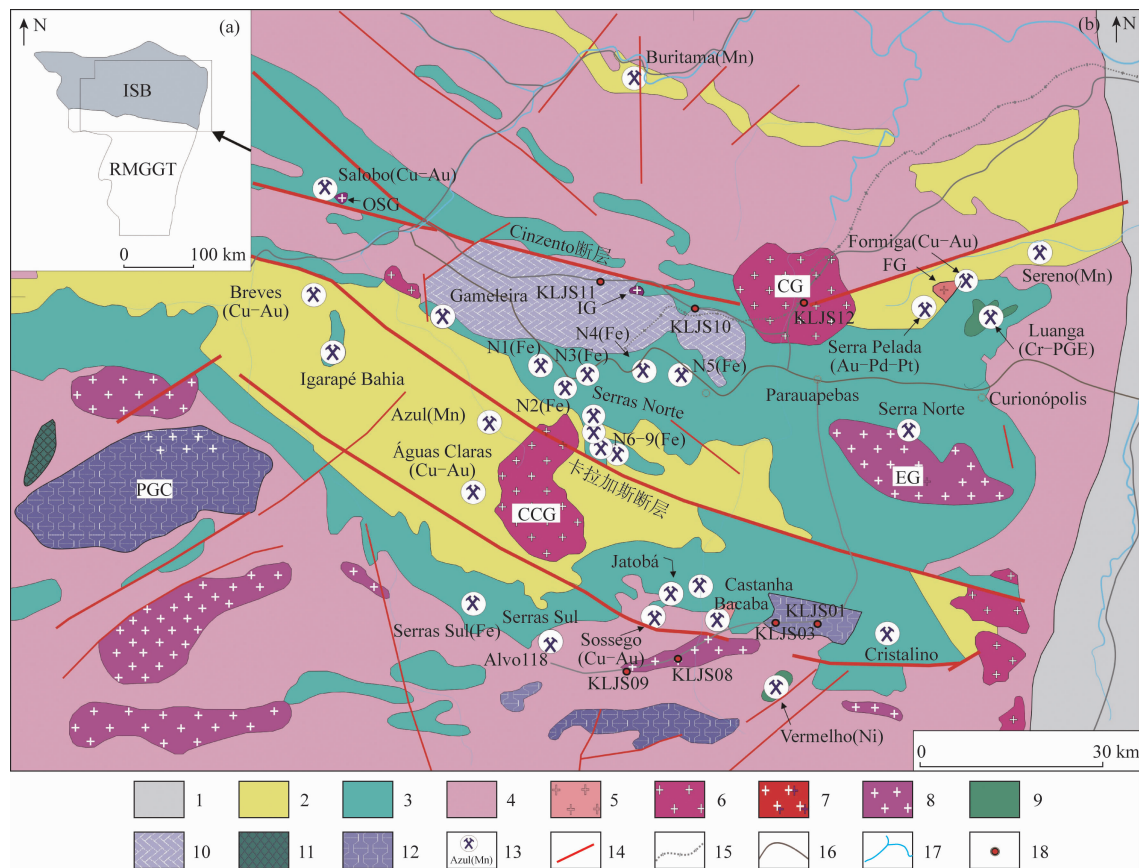
基金项目: 中国地质调查局“华东地区矿山开发与生态修复状况遥感监测(编号: DD20211390)”和中央地质勘查基金“南美地台优势矿产资源成矿规律与潜力分析(编号: 201130D6200119)”项目联合资助。

第一作者简介: 曾勇(1965—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事拉美地区地质构造研究与找矿勘查工作。Email: larryzeng@163.com。

通信作者简介: 刘一(1980—), 女, 高级工程师, 主要从事区域成矿研究和自然资源管理工作。Email: njliuyi025@163.com。

(Itacaiúnas shear belt, ISB) 和南部 Rio Maria 花岗岩 – 绿岩地体 (Rio Maria granitoid – greenstone ter-

rain, RMGGT) 两个构造单元组成, 太古宙和元古宙地层广泛分布 (图 1)。



1. 新元古界一下古生界 Araguaia 超群; 2. 新太古界 Rio Fresco 组/Águas Claras 群; 3. 新太古界 Itacaiúnas 超群; 4. 中太古代兴谷杂岩; 5. 新元古代花岗岩; 6. 古元古代碱性花岗岩; 7. 新太古代碱性片麻状花岗岩; 8. 新太古代钙碱性片麻状花岗岩; 9. 新太古代铁镁质-超铁镁质岩石; 10. 中太古代 TTG 片麻岩; 11. 中太古代铁镁质-超铁镁质岩石; 12. 中太古代麻粒岩杂岩; 13. 重要矿床位置及名称 (矿种); 14. 断层; 15. 铁路; 16. 公路; 17. 水系; 18. 采样点; OSG. 老 Salobo 片麻状花岗岩 (Old Salobo granite); CCG. 卡拉加斯花岗岩 (Central Carajás granite); CG. Cigno 花岗岩 (Cigno granite); PGC. Pium 麻粒岩杂岩 (Pium granulite complex); FG. Formiga 花岗岩 (Formiga granite); EG. Estrela 片麻状花岗岩 (Estrela granite)

图 1 研究区位置 (a) 及卡拉加斯地区地质简图 (b) [7]

Fig. 1 Location of the study area (a) and geological sketch of Carajás area (b) [7]

中太古代岩石单元包括兴谷杂岩、Andorinhas 超群和表壳岩系, 相互之间为构造接触。兴谷杂岩是区域的结晶基底, 由角闪岩相-麻粒岩相的紫苏花岗岩、片麻岩、混合花岗岩-火山沉积岩组成, 年龄为 3.0 ~ 2.8 Ga^[2]。Andorinhas 超群上部为浊积岩以及钙碱性火山岩, 下部由基性火山岩以及超基性火山岩 (科马提岩、纯橄岩、辉石岩、拉斑玄武岩) 组成, 底部为变辉长岩、玄武岩以及英安岩, 年龄在 3.05 ~ 2.92 Ga 之间^[5]。表壳岩系包括 Tucumã 群、São Félix 群和 Gradaús 群, 以变质沉积岩 (杂砂岩和浊积岩) 为主夹基性-超基性火山岩, 年龄约为 (2 868 ± 8) Ma^[6]。

新太古界 Itacaiúnas 超群属于卡拉加斯地区的褶皱基底, 是世界上保存最好的新太古代火山-沉积

岩序列。该超群可被划分为萨洛博 (Igarapé Salobo) 群、波露卡 (Igarapé Pojuca) 群、帕拉 (Grão Pará) 群和巴伊亚 (Igarapé Bahia) 群, 其中的火山活动发生于 2.75 Ga^[2]。上覆新太古界 Águas Claras 群/Rio Fresco 组浅海相-河流相沉积的砂岩和粉砂岩, 被新元古代一早古生代的 Araguaia 超群沉积不整合覆盖^[5]。

卡拉加斯地区最重要的构造形迹是卡拉加斯断层和 Cinzento 断层, 两组断层系呈 NWW-SEE 向斜切卡拉加斯向斜盆地 (图 1)。区域岩石在新太古代末期经历了混合岩化作用, 形成由麻粒岩相、角闪岩相组成的岩石单元, 走滑断层附近的局部地层经历了强烈剪切, 发生角闪岩相动力变质作用^[7]。

2 岩浆侵入作用

卡拉加斯地区发现了多期不同组分的花岗质岩石^[2], 主要集中分布在南部 RMGGT 的周边, 这些岩石大多是从兴谷杂岩逐步分解出来的变质深成侵入体, 经历了复杂的岩浆侵入作用。

中太古代紫苏花岗岩以 Pium 麻粒岩杂岩(Pium granulite complex, PGC)为代表, 产出在 RMGGT 北部边界, 为由镁铁质-长英质岩石组成的暗色麻粒岩和浅色麻粒岩, 主体是浅色的紫苏花岗岩和紫苏花岗闪长岩, 富含条纹钾长石和斜方辉石(紫苏辉石), Pidgeon 等^[8]从中获得了(3 002 ± 14) Ma 的锆石 U-Pb 结晶年龄。

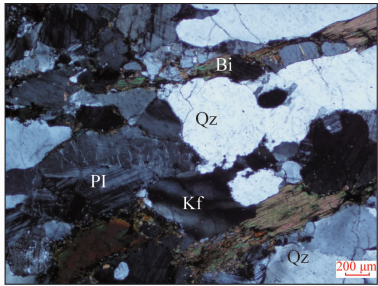
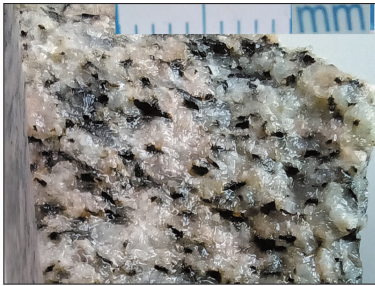
中太古代铁镁质-超铁镁质岩石分布在 RMGGT 中部, 为层状-条带状的铁镁质-超铁镁质岩石组合, 下部为科马提岩和拉斑玄武岩, 上部含有长英质火山岩和沉积岩, 具有杂岩的性质。超铁镁质侵入体的年龄为(2 970 ± 7) Ma^[9], 同时被 Rio Maria 花岗闪长岩侵入。

中太古代 TTG 岩套由两套灰色斜长石-角闪石-黑云母片麻岩组成, 经历了角闪岩相-麻粒岩相变质作用和多期变形作用。早期与 Andorinhas 超群相伴的是英云闪长质片麻岩套, 主要为英云闪长岩((2 924 ± 2) Ma)和奥长花岗岩((2 957 ± 21) Ma)^[10], 其年龄为 3.05~2.92 Ga; 晚期与 Tucumã

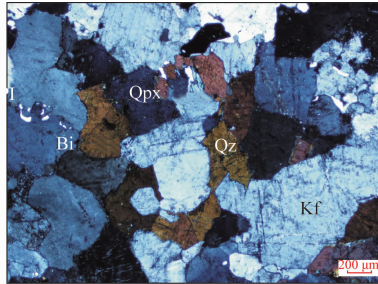
群, São Félix 群和 Gradaús 群相伴的是花岗闪长质片麻岩套, 主要岩性为花岗闪长岩以及奥长花岗岩, 岩石表现出钙碱性花岗岩的特点, 其年龄为 2.87~2.85 Ga^[9-10]。

新太古代铁镁质-超铁镁质岩石主要分布在北部 ISB 和南部 RMGGT 间的过渡区域。如 Vermelho 岩体由变质橄榄岩及变质纯橄榄岩组成, 构造侵位于兴谷杂岩中, 近 EW 向延展, 富含镍和铂族元素, 形成时代为(2 763 ± 6) Ma^[11]; 其他岩性包括(橄榄)辉长岩、苏长岩, 伴有紫苏花岗岩、云英闪长岩、花岗闪长岩等^[11]。

新太古代片麻岩与片麻状花岗质侵入体主要分布于 ISB 北部, 为与 Itacaiúnas 超群相伴的一套片麻岩, 多数是从兴谷杂岩中解体出的新太古代岩石。由片麻岩、片麻状的碱性-亚碱性闪长岩、花岗岩和过碱性花岗岩组成。片麻岩包括花岗质片麻岩(图 2(a), (b), (c))和花岗闪长质片麻岩(图 2(d), (e), (f))。花岗岩有 2 期^[7]: 第一期是 2.76~2.74 Ga 的碱性-亚碱性片麻状(A 型)花岗岩, 呈 NWW 向平行于主要区域构造展布, 呈细长的叶片状构造, 在 Estrela 片麻状花岗岩(Estrela granite, EG)中报道了(2 763 ± 7) Ma 的年龄^[12]; 第二期是 2.68~2.57 Ga 的过碱性和准铝质片麻状花岗岩, 以老 Salobo 片麻状花岗岩(Old Salobo granite, OSG)、Itacaiúnas 片麻状花岗岩(Itacaiúnas granite, IG)为代表, 比第一期花岗岩年龄约 60~80 Ma^[12]。



(a) 花岗质片麻岩野外露头(样品 KLJS10) (b) 花岗质片麻岩细粒变晶结构(样品 KLJS10) (c) 花岗质片麻岩镜下特征(样品 KLJS10)



(d) 花岗闪长质片麻岩野外露头(样品 KLJS11) (e) 花岗闪长质片麻岩中一细粒变晶结构(样品 KLJS11) (f) 花岗闪长质片麻岩镜下特征(样品 KLJS11)

Pl. 斜长石; Bt. 黑云母; Kf. 钾长石; Qz. 石英; Opx. 斜方辉石

图 2-1 卡拉加斯地区花岗质侵入体照片

Fig. 2-1 Photos of metagranitic intrusions in Carajás area

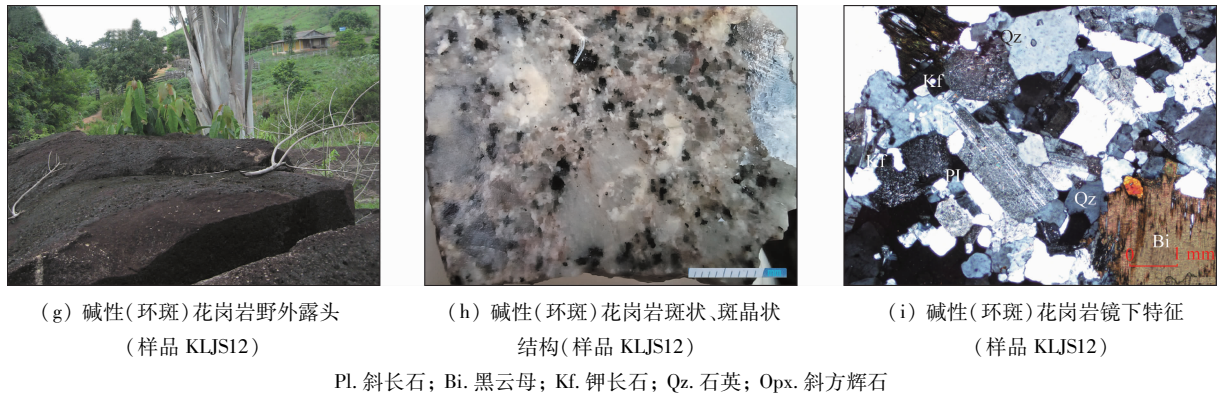


图 2-2 卡拉加斯地区花岗质侵入体照片

Fig. 2-2 Photos of metagranitic intrusions in Carajás area

古元古代卡拉加斯地区发育典型的环斑花岗岩(图 2(g)),主要为二长花岗岩、正长花岗岩及碱性花岗岩,岩石为粗粒花岗结构,晶洞构造,含有巨大的条纹长石或微斜长石聚晶,外绕更长石环带(图 2(h),(i))。其中卡拉加斯花岗岩(Central Carajás granite,CCG)年龄为 $(1\,880\pm2)\text{ Ma}^{[5]}$,Cigano 花岗岩(Cigano granite,CG)年龄为 $(1\,883\pm2)\text{ Ma}^{[5]}$ 。

新元古代末期卡拉加斯地区产生了大量的同褶皱期花岗岩和伟晶岩,常呈复式岩体或杂岩群,单体呈线性延伸,并与区域褶皱构造线一致。岩体内有时可见碳酸岩及其它岩石包裹体,花岗岩的年龄为 $600\sim550\text{ Ma}^{[2]}$,如 Formiga 花岗岩(Formiga granite,FG)。

本文对卡拉加斯地区东北部 Salobo 铜金矿外围和东南部 Sossego 铜金矿外围进行了调查研究,并从兴谷杂岩和新太古代 Itacaiúnas 超群中识别出紫苏花岗岩、片麻岩和变质深成侵入体,在研究程度不足的岩石中采集了样品(图 1)。KLJS01、KLJS03 样点岩性为紫苏花岗岩,是东南部与 PGC 相

伴的岩石;KLJS08、KLJS09 样点在卡拉加斯南部,是岩浆结构清楚的片麻状花岗岩和花岗闪长岩^[4];KLJS10、KLJS11 样点在卡拉加斯北部,为具明显片麻状构造和变晶结构的花岗质片麻岩和花岗闪长质片麻岩,含有少量斜方辉石(图 2(c),(f));KLJS12 样点是具似斑状结构和环斑结构特征的碱性(环斑)花岗岩(图 2(i))。

3 岩浆岩地球化学

岩石地球化学样品的主量、微量与稀土元素分析在原国土资源部华东矿产资源监督检测中心完成。全岩主量元素采用 XFD-1500 测定,分析精度优于 $2\%\sim3\%$;微量元素和稀土元素采用 Finnigan MAT 公司生产的双聚焦高分辨 ICP-MS 测定,检测限优于 0.5×10^{-9} ,相对标准偏差小于 5% ,测试方法和流程受国家标准控制。岩体主量元素、微量元素及稀土元素含量分析结果及特征参数见表 1。

表 1 卡拉加斯地区花岗质侵入体主量元素、稀土元素、微量元素含量及特征参数

Tab.1 Content and characteristic parameters of major elements, REE and trace elements of metagranitic intrusions in Carajás area

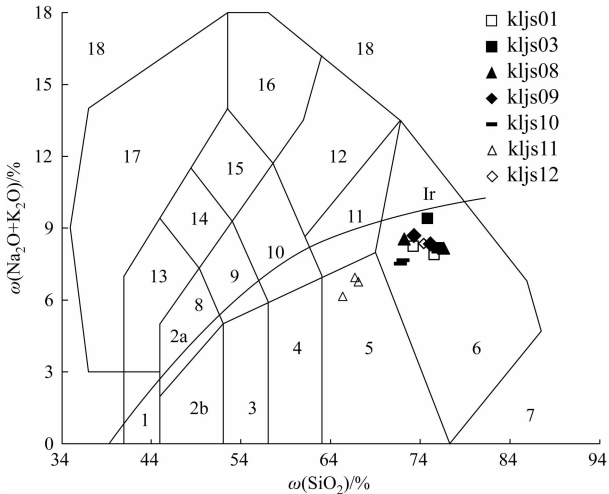
样品号	主量元素含量/%													特征参数		
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	FeO	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	烧失量	K ₂ O ⁺ Na ₂ O	里特曼 指数 σ	A/ CNK	A/ NK
KLJS01-02	73.22	13.80	0.84	0.80	0.66	4.08	0.56	0.02	4.17	0.08	0.24	0.80	8.25	2.25	1.08	1.22
KLJS01-04	75.57	13.50	0.68	0.73	0.16	2.67	0.16	0.02	5.23	0.01	0.05	0.50	7.90	1.91	1.06	1.17
KLJS03-01	75.90	11.89	0.43	1.07	1.60	5.23	0.15	0.02	2.95	0.02	0.23	0.43	8.18	2.03	1.05	1.13
KLJS03-02	74.82	12.03	0.34	1.99	0.38	6.87	0.04	0.00	2.54	0.03	0.21	0.20	9.41	2.77	0.98	1.04
KLJS08-01	76.62	12.03	0.99	0.53	1.17	4.68	0.03	0.03	3.48	0.01	0.10	0.65	8.16	1.98	0.96	1.12
KLJS08-02	72.24	12.82	1.58	0.77	1.99	5.03	0.10	0.03	3.51	0.01	0.16	1.00	8.54	2.49	0.91	1.14
KLJS09-01	75.15	13.12	1.20	0.57	0.59	5.08	0.16	0.02	3.26	0.03	0.13	0.33	8.34	2.16	1.01	1.21
KLJS09-02	73.31	13.42	1.21	0.70	0.99	5.54	0.31	0.01	3.15	0.06	0.19	0.36	8.69	2.48	1.00	1.20
KLJS10-01	72.09	13.91	2.03	0.79	1.58	4.15	0.32	0.01	3.51	0.06	0.27	0.41	7.66	2.01	1.00	1.36
KLJS10-02	71.80	14.17	2.16	0.78	1.56	3.85	0.31	0.01	3.67	0.06	0.26	0.51	7.52	1.96	1.00	1.39
KLJS11-01	66.73	15.33	3.23	0.91	3.61	2.58	0.78	0.03	4.37	0.13	0.46	0.88	6.95	2.02	0.97	1.54
KLJS11-02	67.12	15.33	3.32	1.07	3.57	2.13	0.74	0.03	4.64	0.12	0.46	0.41	6.77	1.88	0.96	1.54
KLJS11-03	65.36	14.28	3.90	1.43	4.02	2.02	2.95	0.04	4.14	0.14	0.54	0.98	6.16	1.68	0.89	1.59
KLJS12-02	74.40	12.71	1.22	0.94	1.60	5.07	0.10	0.03	3.29	0.03	0.21	0.56	8.36	2.23	0.97	1.17

续表																	
样品号	微量元素含量/ 10^{-6}										稀土元素含量/ 10^{-6}						
	Li	Ga	Rb	Sr	Zr	Nb	Ba	Hf	Th	U	La	Ce	Pr	Nd	Sm		
KLJS01-02	32.1	73.0	7.0	23.7	4.0	18.2	101.0	146.0	199.0	8.24	885.0	5.9	31.5	3.14	3.59		
KLJS01-04	9.6	16.3	2.7	7.0	2.5	16.2	58.7	120.0	160.0	1.40	385.0	7.0	42.6	9.50	1.16		
KLJS03-01	76.3	154.0	16.8	58.0	2.2	18.1	132.0	39.6	313.0	21.00	866.0	10.0	38.3	7.08	10.20		
KLJS03-02	90.4	180.0	21.2	71.7	0.9	15.4	137.0	31.2	361.0	21.20	1 011.0	10.0	33.4	4.74	13.00		
KLJS08-01	56.9	125.0	14.3	50.1	3.1	30.5	279.0	22.2	194.0	95.20	109.0	9.9	92.8	26.60	12.60		
KLJS08-02	4.9	36.5	275.0	27.2	311.0	107.0	241.0	15.6	160.0	39.00	90.4	196.0	22.5	78.30	18.60		
KLJS09-01	7.7	15.9	141.0	186.0	142.0	2.9	1 313.0	4.7	46.9	11.50	35.2	62.8	6.7	21.70	3.10		
KLJS09-02	10.8	17.8	163.0	193.0	220.0	3.6	1 396.0	6.7	57.6	7.06	72.3	140.0	14.0	42.90	5.89		
KLJS10-01	6.8	16.2	84.8	108.0	227.0	6.9	1 242.0	6.1	26.9	3.36	27.3	36.9	3.0	8.21	0.92		
KLJS10-02	7.0	17.1	86.9	119.0	191.0	6.4	1 268.0	5.0	32.0	6.15	49.4	53.1	5.4	15.30	1.46		
KLJS11-01	5.3	21.2	57.7	227.0	446.0	13.7	1 571.0	11.0	199.0	4.74	56.3	103.0	10.6	38.50	6.81		
KLJS11-02	4.7	21.5	40.2	223.0	397.0	12.0	1 254.0	9.9	19.1	2.88	50.7	74.4	8.2	27.90	4.57		
KLJS11-03	3.0	19.5	43.1	175.0	386.0	10.7	1 273.0	8.7	32.2	2.34	85.8	141.0	12.8	39.20	6.15		
KLJS12-02	21.6	24.2	221.0	87.9	347.0	43.0	753.0	10.8	83.1	23.50	252.0	422.0	40.5	115.00	19.20		
样品号	稀土元素含量/ 10^{-6}										特征参数						
	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	LREE	HREE	ΣREE	LREE/ HREE	(La/ Yb) _N	δEu	δCe
KLJS01-02	0.62	1.95	0.25	1.06	0.17	0.39	0.05	0.36	0.07	4.48	140.02	4.30	144.32	32.56	84.02	0.69	0.88
KLJS01-04	0.39	0.86	0.13	0.73	0.14	0.41	0.08	0.53	0.11	3.32	36.51	2.99	39.50	12.21	17.09	1.22	0.66
KLJS03-01	0.95	7.96	1.27	7.28	1.45	4.15	0.68	4.23	0.69	38.00	316.25	27.71	343.96	11.41	17.00	0.33	0.78
KLJS03-02	1.24	10.00	1.48	7.41	1.32	3.38	0.51	2.97	0.48	32.50	377.54	27.55	405.09	13.70	28.68	0.34	0.75
KLJS08-01	0.55	13.60	2.64	17.70	3.93	12.00	1.95	11.90	1.87	101.00	259.45	65.59	325.04	3.96	4.51	0.14	0.81
KLJS08-02	0.70	19.50	3.76	24.90	5.58	17.40	2.94	18.50	2.99	177.00	406.50	95.57	502.07	4.25	4.60	0.12	0.80
KLJS09-01	0.48	1.62	0.18	0.70	0.11	0.27	<0.05	0.31	0.05	3.20	129.98	3.24	133.22	40.12	107.00	0.63	0.72
KLJS09-02	0.61	2.66	0.30	1.09	0.17	0.39	0.06	0.40	0.07	4.42	275.70	5.14	280.84	53.64	170.32	0.43	0.78
KLJS10-01	0.81	0.52	0.07	0.32	0.06	0.18	<0.05	0.22	<0.05	1.74	77.12	1.37	78.49	56.29	116.93	3.49	0.64
KLJS10-02	1.04	0.85	0.10	0.44	0.09	0.24	<0.05	0.25	<0.05	2.84	125.70	1.97	127.67	63.81	186.20	2.80	0.51
KLJS11-01	1.20	5.50	0.88	4.83	0.91	2.44	0.37	2.12	0.34	22.90	216.41	17.39	233.80	12.44	25.02	0.62	0.75
KLJS11-02	1.15	3.83	0.58	3.16	0.61	1.73	0.27	1.64	0.28	16.40	166.87	12.10	178.97	13.79	29.13	0.88	0.63
KLJS11-03	1.36	4.73	0.69	3.72	0.68	1.76	0.26	1.58	0.27	17.50	286.31	13.69	300.00	20.91	51.17	0.79	0.72
KLJS12-02	1.68	14.70	2.41	13.90	2.87	8.35	1.38	8.60	1.40	77.20	850.38	53.61	903.99	15.86	27.61	0.31	0.72

3.1 主量元素

卡拉加斯地区花岗质侵入体中 14 个样品的主量元素含量见表 1。样品的里特曼指数 σ 介于 1.68~2.77,显示岩体属于钙碱性岩系,在 TAS 图解(图 3)中样品皆落在亚碱性花岗岩区域;样品均符合 $n(\text{Al}_2\text{O}_3) < n(\text{CaO}) + n(\text{Na}_2\text{O}) + n(\text{K}_2\text{O})$ (n 为分子数),属于准铝质系列岩浆岩类型。各岩体均为富硅岩石,在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解中(图 4(a))主要落在高钾钙碱性系列区域。岩石的铝饱和度 $\text{Al}/\text{CNK} = n(\text{Al}_2\text{O}_3)/[n(\text{CaO}) + n(\text{K}_2\text{O}) + n(\text{Na}_2\text{O})]$ (0.89~1.08)均小于 1.1,属于准铝质-弱过铝质系列, $\text{A}/\text{NK} - \text{A}/\text{CNK}$ 图解中样点投影都落在准铝质区域或弱过铝质区域(图 4(b))。总体上主量元素表现为准铝质钙碱性花岗岩的化学组成特征。

紫苏花岗岩显示出高 Si、高 Al、低 Mg、Ni、Cr,主成分变化大且 $w(\text{K}_2\text{O}) > w(\text{Na}_2\text{O})$ 的地球化学特征;片麻状花岗岩(花岗闪长岩)与花岗质片麻岩均含较高的 Al_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O ,且 $w(\text{Na}_2\text{O}) > w(\text{K}_2\text{O})$,总体低 Mg、Ni、Cr,与 TTG 岩套的化学组成相似^[13]。碱性(环斑)花岗岩岩浆分异演化较彻底,为正常花岗岩。



1. 橄榄辉长岩; 2a. 碱性辉长岩; 2b. 亚碱性辉长岩; 3. 辉长闪长岩; 4. 闪长岩; 5. 花岗闪长岩; 6. 花岗岩; 7. 硅英岩; 8. 二长辉长岩; 9. 二长闪长岩; 10. 二长岩; 11. 石英二长岩; 12. 正长岩; 13. 副长石辉长岩; 14. 副长石二长闪长岩; 15. 副长石二长正长岩; 16. 副长正长岩; 17. 副长深成岩; 18. 霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩; Ir. Irvine 分界线,上方为碱性,下方为亚碱性

图 3 卡拉加斯地区岩花岗质侵入体 TAS 图解
Fig.3 TAS diagram of metagranitic intrusions in Carajás area

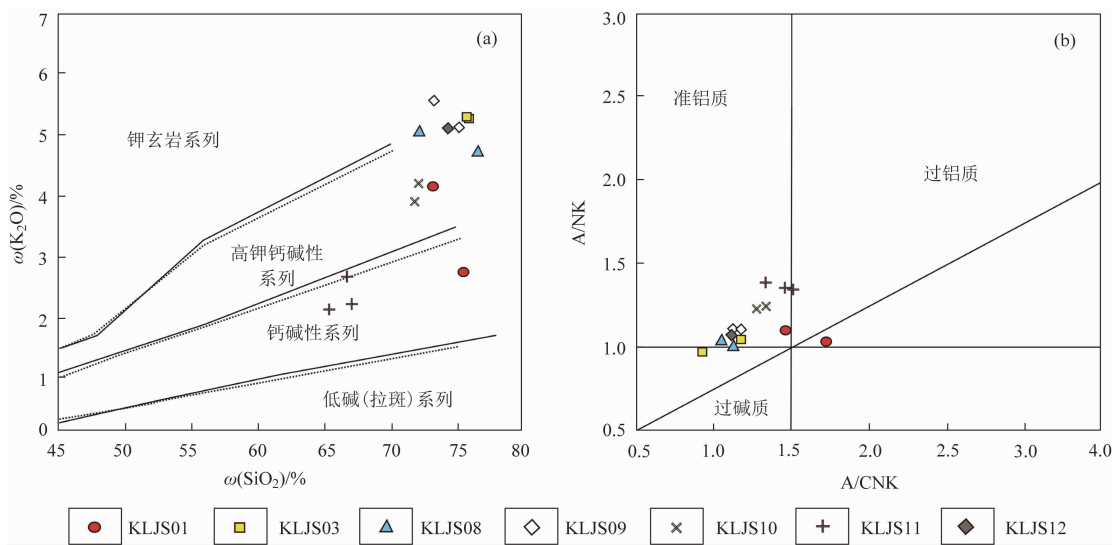


图 4 卡拉加斯地区花岗质侵入体 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解 (a) 和 $\text{A/NK} - \text{A/CNK}$ 图解 (b)

Fig. 4 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ diagram (a) and $\text{A/NK} - \text{A/CNK}$ diagram (b) of metagranitic intrusions in Carajás area

3.2 微量元素与稀土元素

花岗质侵入中微量元素 K、Ba、Rb、Th 等大离子亲石元素和稀土元素 La、Ce 含量较高,而 Nb、Ta、Hf、Y、Eu、U、P 等高场强元素的含量较低,大部分存在明显亏损(表 1)。在原始地幔标准化蛛网图上(图 5(a)),出现了明显的 K、Ba、P、Sm 亏损,样品间的差异在于富集与亏损的程度略有不同。仅 KLJS12 微量元素中大离子亲石元素高度富集,高 Nb、Rb、W 和 Sn,高强场元素也相对富集,如 Ta、Zr、Hf、Th,而贫铁族元素,与其岩性为碱性岩石及与 W、Sn 成矿关系密切。

微量元素分析表明,花岗质侵入中 Ni、Cr 的含量远低于原始地幔中 Ni、Cr 的平均值,也低于中国扬子下地壳 Ni、Cr 的平均值^[14],表明这些地区岩浆

的物质来源不是直接由原始地幔基性岩浆分离结晶形成,而是起源于古老大陆基底地壳中的沉积。

花岗质侵入的 Rb/Sr 值为 0.18 ~ 12.6,平均值 2.7,明显高于全球上地壳的平均值(0.32)^[15],是克拉通地区大量岩浆受到大陆壳中物源介入的结果。样品 KLJS11 的 Rb/Sr 值为 0.18 ~ 0.25,可能与板块俯冲的混染作用有关。

卡拉加斯地区花岗质侵入的 ΣREE 相差较大,平均为 285.50×10^{-6} , ΣREE 最少的紫苏花岗岩(KLJS01 - 04)为 $39.5 \times 10^{-6} \Sigma \text{REE}$,最大的为碱性(晶洞)花岗岩(KLJS12 - 02)为 903.99×10^{-6} 。LREE/HREE 值平均为 25.35,轻稀土相对富集,总体属于右倾型配分模式(图 5(b)),显示轻/重稀土分异, Eu 元素相对亏损。

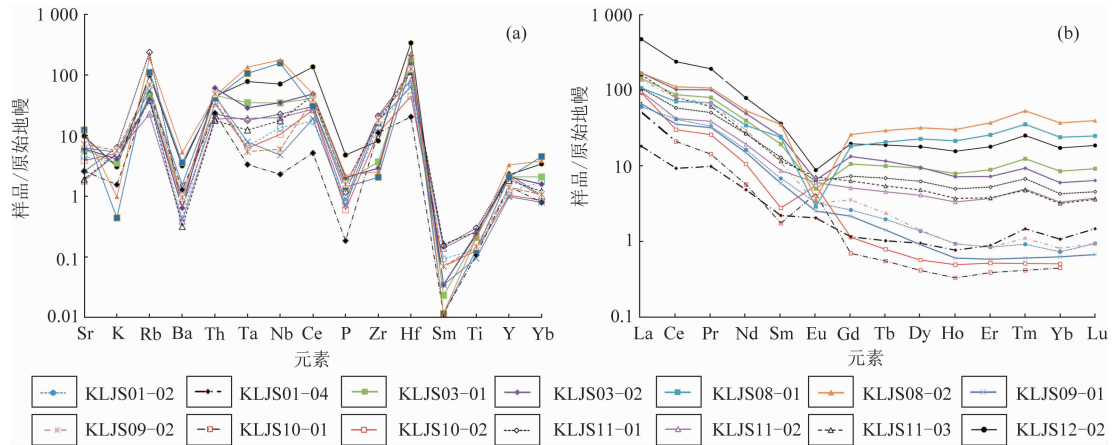


图 5 卡拉加斯地区花岗质侵入体微量元素蛛网图 (a) 和稀土元素配分曲线 (b)

Fig. 5 Trace element spider diagram (a) and REE distribution pattern (b) of metagranitic intrusions in Carajás area

紫苏花岗岩 (KLJS1 和 KLJS3) 的稀土元素配分曲线显示为缓倾斜的海鸥型曲线,尾端略向上扬起,ΣREE 相对较大,富集程度较高,富集 LRRE 而亏损 HREE,但两个样品 Sr、Y、Yb 元素的含量变化较大, Eu 异常差异较大。

片麻状花岗岩 (KLJS08 和 KLJS09) 和新太古界 Itacaiúnas 超群中的花岗质片麻岩 (KLJS10 和 KLJS11) 样品的稀土元素配分曲线 (图 5(b)) 为向右倾斜的圆弧型曲线,尾端水平,显示 ΣREE 偏低,略富集 LRRE,亏损 HREE,低中度富集 Sr、Y 和 Yb 元素,具有高 La/Yb 值和低 Nb/Ta 值,且无明显负 Eu 异常。由于片麻状花岗岩中存在相对较多的斜长石和钾长石,其岩浆分异过程中残留矿物主要为角闪石、石榴子石和金红石等,指示具有 TTG 岩套的总体特征,推测其熔融深度大,是俯冲板片深部熔融过程中形成的 TTG 岩套。北部花岗质片麻岩 (KLJS10) 出现明显的正 Eu 异常,性质不明,推测它与受到污染的岛弧花岗岩关系密切^[16]。

碱性(环斑)花岗岩 (KLJS12) 稀土元素配分曲线为陡倾斜的海鸥型曲线,尾端水平,显示稀土总量大、稀土富集程度高,但 LRRE 元素含量变化不大,富集 Yb、中度富集 Y、Sr,明显亏损 Eu。说明其形成的环境产生了重大变化,已经转换为伸展为主导的构造体制。

4 岩浆岩同位素年龄

4.1 样品采集及测定方法

锆石样品破碎和挑选由河北区域地质矿产调查研究所实验室完成,锆石微区原位 U – Pb 同位素测定在中国地质调查局天津地质调查中心(天津地质矿产研究所)同位素实验室完成,获得的分析数据采用 GJ-1 作为外部锆石年龄标准进行 U、Pb 同位素分馏校正处理,数据处理采用刘勇胜^[17]研发的 ICP MS DataCal 程序和 Ludwig 研发的 Isoplot 程序进行,仪器配置和实验流程参见文献[18],测试结果见表 2。

表 2 卡拉加斯地区花岗质侵入体锆石 U – Pb 测年结果
Tab.2 Zircon U – Pb ages of metagranitic intrusions in Carajás area

测点号	元素含量/10 ⁻⁶		同位素比值及误差						年龄及误差/Ma	
	Pb	U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
KLJS10-1	294.14	2 647.24	0.097 6	0.000 6	1.442 2	0.010 6	0.107 1	0.000 7	656	4
KLJS10-2	331.43	799.57	0.170 6	0.001 1	8.556 5	0.071 7	0.363 8	0.002 8	2 000	15
KLJS10-3	384.99	2 238.13	0.113 0	0.000 7	2.154 3	0.014 9	0.138 3	0.000 9	835	5
KLJS10-4	304.98	2 328.78	0.117 5	0.000 8	1.974 7	0.016 3	0.121 9	0.000 9	742	5
KLJS10-5	375.48	2 689.23	0.131 7	0.000 9	2.268 8	0.015 9	0.125 0	0.000 8	759	5
KLJS10-6	435.85	2 878.22	0.121 9	0.000 8	2.461 8	0.017 1	0.146 5	0.000 9	881	6
KLJS10-7	1 006.29	4 506.93	0.148 1	0.000 9	4.367 4	0.035 6	0.213 9	0.001 6	1 250	9
KLJS10-8	359.95	1 691.29	0.138 0	0.000 9	3.822 0	0.030 8	0.200 9	0.001 4	1 180	8
KLJS10-9	696.80	1 614.13	0.174 1	0.001 1	9.458 3	0.092 0	0.394 0	0.003 5	2 142	19
KLJS10-10	296.15	1 871.92	0.120 9	0.000 8	2.587 1	0.031 2	0.155 2	0.001 6	930	9
KLJS10-11	276.98	1 467.24	0.131 3	0.000 8	3.323 0	0.028 1	0.183 6	0.001 4	1 087	8
KLJS10-12	401.42	2 003.31	0.135 6	0.000 9	3.606 0	0.033 6	0.192 9	0.001 5	1 137	9
KLJS10-13	612.57	2 918.85	0.142 8	0.001 0	4.028 8	0.057 4	0.204 6	0.002 3	1 200	13
KLJS10-14	607.09	4 594.76	0.126 1	0.000 8	2.049 0	0.016 5	0.117 8	0.000 8	718	5
KLJS10-15	295.09	1 525.40	0.135 8	0.000 9	3.527 4	0.038 2	0.188 4	0.001 7	1 113	10
KLJS10-16	725.57	2 046.11	0.168 6	0.001 1	7.540 3	0.054 5	0.324 3	0.002 2	1 811	12
KLJS10-17	609.33	2 860.57	0.144 5	0.001 0	4.124 4	0.049 9	0.207 0	0.002 1	1 213	12
KLJS10-18	475.27	1 418.40	0.166 4	0.001 1	7.129 1	0.052 3	0.310 7	0.002 0	1 744	11
KLJS10-19	370.68	2 235.55	0.128 2	0.000 9	2.904 6	0.042 0	0.164 4	0.001 8	981	11
KLJS10-20	366.20	3 146.11	0.109 2	0.001 0	1.540 4	0.025 8	0.102 3	0.001 1	628	7
KLJS10-21	398.59	2 055.61	0.133 2	0.000 8	3.474 3	0.027 8	0.189 1	0.001 4	1 117	8
KLJS10-22	706.59	3 155.06	0.146 4	0.001 0	4.263 8	0.038 1	0.211 2	0.001 6	1 235	9
KLJS10-23	415.97	2 328.94	0.139 9	0.000 9	3.146 4	0.023 4	0.163 1	0.001 1	974	7
KLJS10-24	471.87	2 821.80	0.125 5	0.000 8	2.863 9	0.029 4	0.165 5	0.001 4	987	8
KLJS11-1	1 319.66	2 516.07	0.176 0	0.001 1	11.414 4	0.080 0	0.470 4	0.003 0	2 485	16
KLJS11-2	358.51	1 575.20	0.135 4	0.000 9	4.037 7	0.028 6	0.216 3	0.001 3	1 262	8

续表

测点号	元素含量/ 10^{-6}		同位素比值及误差						年龄及误差/Ma	
	Pb	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
KLJS11-3	930.92	2 028.70	0.170 9	0.001 1	10.059 4	0.090 5	0.427 0	0.003 3	2 292	18
KLJS11-4	954.58	2 310.01	0.172 0	0.001 1	8.860 3	0.068 5	0.373 7	0.002 7	2 047	15
KLJS11-5	407.74	2 650.38	0.124 9	0.000 8	2.497 6	0.021 4	0.145 0	0.001 1	873	7
KLJS11-6	526.27	2 605.09	0.136 5	0.000 9	3.620 9	0.025 2	0.192 3	0.001 2	1 134	7
KLJS11-7	464.91	1 576.97	0.151 4	0.001 0	5.870 2	0.041 0	0.281 3	0.001 8	1 598	10
KLJS11-8	173.49	1 168.78	0.124 0	0.000 9	2.511 8	0.023 7	0.146 9	0.001 1	884	7
KLJS11-9	544.52	1 473.30	0.161 0	0.001 0	7.792 8	0.056 3	0.351 0	0.002 3	1 939	13
KLJS11-10	476.90	1 957.64	0.145 8	0.000 9	4.719 7	0.034 3	0.234 8	0.001 5	1 360	9
KLJS11-11	474.82	2 335.42	0.133 0	0.000 8	3.637 4	0.025 9	0.198 3	0.001 3	1 166	7
KLJS11-12	724.04	1 409.66	0.177 3	0.001 1	11.709 5	0.082 5	0.479 1	0.003 0	2 523	16
KLJS11-13	1 383.21	3 311.51	0.169 8	0.001 1	8.968 2	0.072 7	0.383 1	0.002 9	2 091	16
KLJS11-14	590.60	1 892.26	0.157 3	0.001 0	6.486 8	0.048 3	0.299 2	0.002 0	1 687	11
KLJS11-15	496.19	1 828.07	0.147 4	0.000 9	5.322 8	0.044 4	0.261 8	0.002 0	1 499	11
KLJS11-16	393.79	1 809.83	0.135 7	0.000 9	3.770 3	0.030 7	0.201 5	0.001 4	1 184	8
KLJS11-17	435.55	2 051.95	0.137 3	0.000 9	3.872 7	0.028 6	0.204 5	0.001 3	1 200	8
KLJS11-18	557.74	1 952.01	0.153 6	0.001 0	5.770 5	0.071 8	0.272 4	0.002 8	1 553	16
KLJS11-19	828.14	1 922.84	0.170 1	0.001 1	9.815 4	0.078 3	0.418 4	0.003 0	2 253	16
KLJS11-20	671.17	2 323.18	0.155 8	0.001 0	5.913 0	0.051 1	0.275 2	0.002 1	1 567	12
KLJS11-21	542.60	2 125.54	0.148 3	0.001 0	5.037 4	0.039 6	0.246 4	0.001 6	1 420	9
KLJS11-22	564.34	2 243.12	0.148 2	0.000 9	4.989 1	0.039 6	0.244 1	0.001 7	1 408	10
KLJS11-23	827.09	2 211.40	0.163 8	0.001 2	7.011 9	0.116 9	0.310 5	0.003 8	1 743	21
KLJS11-24	479.92	1 704.81	0.151 3	0.001 0	5.665 0	0.057 2	0.271 5	0.002 4	1 548	14
KLJS12-1	131.24	437.68	0.115 7	0.001 0	4.437 3	0.042 8	0.278 3	0.001 7	1 583	10
KLJS12-2	776.09	2 548.71	0.113 6	0.001 0	4.481 0	0.043 8	0.286 1	0.001 8	1 622	10
KLJS12-3	187.01	666.61	0.112 6	0.001 0	4.056 9	0.044 8	0.261 4	0.002 1	1 497	12
KLJS12-4	20.77	51.85	0.119 1	0.001 4	5.348 9	0.067 2	0.325 9	0.001 9	1 818	11
KLJS12-5	70.34	204.15	0.116 3	0.001 1	5.041 1	0.049 9	0.314 4	0.001 9	1 762	11
KLJS12-6	71.07	202.45	0.115 6	0.001 1	4.979 7	0.048 6	0.312 4	0.001 9	1 752	11
KLJS12-7	79.26	222.11	0.116 0	0.001 1	4.866 2	0.046 9	0.304 3	0.001 9	1 712	11
KLJS12-8	134.82	452.03	0.115 6	0.001 0	4.387 9	0.042 0	0.275 2	0.001 7	1 567	10
KLJS12-9	53.31	159.80	0.119 5	0.001 2	4.812 8	0.047 7	0.292 0	0.001 6	1 652	9
KLJS12-10	92.77	250.12	0.116 2	0.001 1	4.751 3	0.045 9	0.296 5	0.001 6	1 674	9
KLJS12-11	424.63	1 095.58	0.120 2	0.001 1	5.944 5	0.054 5	0.358 8	0.001 9	1 976	10
KLJS12-12	293.93	901.66	0.115 6	0.001 0	4.820 8	0.044 9	0.302 3	0.001 7	1 703	10
KLJS12-13	619.73	4 314.38	0.093 9	0.000 8	1.756 1	0.016 5	0.135 7	0.000 8	820	5
KLJS12-14	82.32	246.81	0.117 4	0.001 1	4.819 3	0.045 9	0.297 8	0.001 7	1 680	10
KLJS12-15	80.50	229.36	0.116 8	0.001 1	4.847 9	0.045 6	0.301 0	0.001 7	1 696	10
KLJS12-16	760.96	4 922.88	0.098 5	0.000 9	2.004 9	0.018 7	0.147 6	0.000 8	887	5
KLJS12-17	134.99	323.30	0.136 9	0.001 2	6.030 7	0.055 4	0.319 6	0.001 7	1 788	10
KLJS12-18	453.66	3 323.19	0.089 4	0.000 8	1.619 4	0.015 5	0.131 3	0.000 8	796	5
KLJS12-19	1 588.73	8 261.80	0.101 5	0.000 9	2.778 8	0.025 6	0.198 6	0.001 1	1 168	6
KLJS12-20	74.59	205.52	0.117 5	0.001 1	5.149 9	0.049 1	0.317 8	0.001 7	1 779	10
KLJS12-21	124.05	347.05	0.116 1	0.001 0	5.222 3	0.048 5	0.326 2	0.001 7	1 820	10
KLJS12-22	56.84	152.99	0.116 6	0.001 1	5.260 4	0.050 1	0.327 2	0.001 7	1 825	10
KLJS12-23	512.81	2 641.93	0.109 7	0.001 0	2.672 3	0.026 0	0.176 7	0.001 1	1 049	7
KLJS12-24	206.91	1 020.62	0.113 0	0.001 8	2.854 2	0.082 0	0.183 2	0.002 7	1 084	16

4.2 测年结果

从卡拉加斯地区北部 Salobo 铜金矿外围的 3 个样品 (KLJS10、KLJS11、KLJS12) 中共选取 72 颗锆石, 锆石形态在阴极发光图像上呈自形柱状, 晶棱锋锐、清晰, 大小 60 ~ 200 μm , 大部分锆石震荡

环带发育, $\text{U}/\text{Th} > 1$ ($\text{U}/\text{Th} = 2.65$), 显示为岩浆结晶锆石。部分锆石边部有窄的增生边, 表明可能遭受过后期构造热事件的改造。

卡拉加斯地区北部 Salobo 铜金矿外围的 3 个样品, 岩性为花岗质片麻岩、花岗闪长质片麻岩和

碱性(环斑)花岗岩。其中:KLJS10 为花岗质片麻岩,锆石 U-Pb 同位素测点 24 个,谐和图显示在谐和线下方呈较好的不一致线,表明该花岗岩受到后期构造热事件的影响,发生了程度较强的铅丢失^[19],不一致线上交年龄为($2\,637 \pm 45$) Ma,代表岩石的形成时间(图 6(a));KLJS11 为花岗闪长质片麻岩,锆石 U-Pb 同位素测点 24 个,谐和线下方

有较好的不一致线,不一致线上交年龄为($2\,622 \pm 22$) Ma,代表岩石的形成时间(图 6(b));KLJS12 为碱性(环斑)花岗岩,锆石 U-Pb 同位素测点 24 个。谐和图显示在谐和线下方呈较好的不一致线,表明该花岗岩同样受到后期构造热事件的影响,发生了铅丢失,不一致线上交年龄为($1\,919 \pm 18$) Ma,代表着岩方的形成时间(图 6(c))。

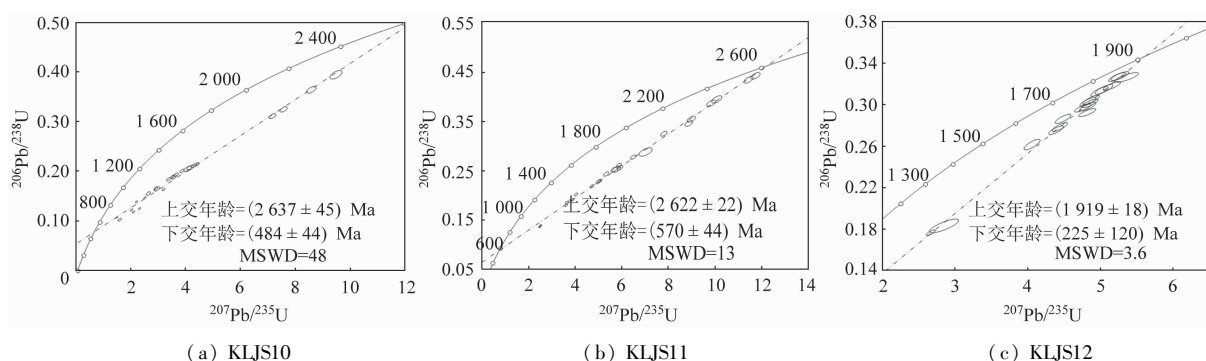


图 6 卡拉加斯北部地区花岗质侵入体锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 Zircon U-Pb age concordia diagrams of metagranitic intrusions in Northern Carajas area

采自卡拉加斯地区北部 Salobo 铜金矿外围的 3 个样品的 U-Pb 测年结果显示:花岗质和花岗闪长质片麻岩(KLJS10 和 KLJS11)的原岩形成时代较为一致,分别为($2\,637 \pm 45$) Ma 和($2\,622 \pm 22$) Ma,代表新太古代与 Itacaiúnas 超群相伴的片麻岩套,以及碱性-亚碱性闪长岩、花岗岩和过碱性花岗岩侵入体,如 OSG、IG 等;碱性(环斑)花岗岩(KLJS12)为古元古代岩浆活动的产物,Souza 等^[5]在其中获得了($1\,883 \pm 2$) Ma 的年龄。

卡拉加斯地区南部 Sossego 铜金矿床外围的 3 个样品已经有相应的测年成果^[4],U-Pb 测年结果显示:从 KLJS01 紫苏花岗岩和 KLJS03 紫苏花岗岩获得了($2\,899 \pm 45$) Ma 和($2\,742 \pm 9.5$) Ma 的锆石 U-Pb 年龄,该样品是与 PGC 相伴的紫苏花岗岩,是南美克拉通早期陆壳的组成部分;从 KLJS09 片麻状黑云母花岗闪长岩中获得了($2\,831 \pm 19$) Ma 的锆石 U-Pb 年龄,它与这一地区中太古代 TTG 岩套的年龄一致,是中太古代时期二阶段的岩浆作用的表现。

卡拉加斯地区所获得的 6 个样品的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄主要集中在 $2\,899 \sim 2\,831$ Ma、 $2\,742 \sim 2\,622$ Ma 和 $1\,919$ Ma 3 个时期,岩浆侵入活动跨越中太古代—新元古代岩浆发展阶段,分别对应的南美克拉通的热事件分别为 3.2 Ga、 $3.05 \sim 2.85$ Ga、 $2.76 \sim 2.57$ Ga、 $2.25 \sim 2.22$ Ga、 $2.0 \sim$

1.8 Ga^[2]中的 3 个阶段,即与源区 5 个比较强烈的锆石形成热事件以及南美克拉通早期陆壳演化的主要构造阶段在时间上基本一致,充分说明其结果的可靠性。

5 构造岩浆作用与地壳演化

5.1 构造岩浆作用

卡拉加斯地区古老的花岗质侵入体构成了该区跨越太古宙,经元古宙至古生代的构造岩浆体系。

中太古代紫苏花岗岩和紫苏花岗闪长岩以 PGC 为代表,是由闪长质-英云闪长质岩石重熔并经历角闪岩相-麻粒岩相变质作用而成,目前其构造意义尚不明确。铁镁质-超铁镁质岩石为层状-条带状的岩石组合,含有科马提岩和拉斑玄武岩,来源于绿岩带形成早期的岩浆事件^[20],其成因可能与早期的地幔柱相关。TTG 岩套由英云闪长质母岩浆分离结晶派生而来的英云闪长岩型 TTG 片麻岩套,以及花岗闪长岩型 TTG 花岗片麻岩套组成,与绿岩带早期的科马提岩和拉斑玄武岩相伴,结合其成分特点和时空关系,推测其受高度熔融的地幔柱构造所控制。

新太古代铁镁质-超铁镁质岩石以 Vermelho 岩体和 Luanga 岩体为代表,岩体富 Ni、Mg,构造侵位于兴谷杂岩和 Andorinhas 绿岩带基底中,是板块

碰撞作用发生前的基性—超基性杂岩组合,标志着卡拉加斯火山沉积盆地的形成,具有蛇绿岩的特点,其成因可能与早期的板块构造相关^[2]。第一期花岗质片麻岩和花岗闪长质片麻岩为俯冲环境下的 TTG 岩套,显示出同构造的性质,为强烈的地壳改造(大陆弧)或同碰撞时期的花岗质岩石^[12],并伴有同期的 A 型花岗岩;第二期碱性—准铝质的片麻状花岗岩与铜金矿的形成生相关,形成以 Salobo 铜金矿为代表的与古老大陆裂谷盆地热水沉积以及碱性花岗岩侵入有关的铁氧化物铜—金—铀矿床(iron oxide—copper—gold deposits, IOCG)^[21-22],热水沉积体系的发展是盆地拉张动力的结果。

古元古代碱性(环斑)花岗岩产生于在一个特定的时间跨度(1.92~1.87 Ga),是南美克拉通区域广泛分布的元古宙 A 型花岗岩的一部分^[5],属于碱性的非造山花岗岩,常见云英岩化,形成了广泛的铜、铁和锡矿化。

新元古代花岗岩代表了巴西利亚旋回花岗岩岩浆作用的开始,接触带常具矽卡岩化,与金矿成矿关系密切。

5.2 构造岩浆过程

卡拉加斯地区经历了太古宙—元古宙—古生代的构造岩浆发展和岩浆演化,反映南美克拉通形成并经历了哥伦比亚(Columbia)超大陆和罗迪尼亚(Rodinia)超大陆汇聚、裂解的过程^[23],这也是该地区造山作用和板块构造发生、发展的结果。卡拉加斯地区的构造岩浆过程可分为 5 个时期。

(1) 古太古代南美克拉通残存着古老的陆核。在 KLJS01—03 样品得到了继承锆石或捕获锆石的年龄为 3 223~3 205 Ma,最老为 3 467 Ma 的结果^[4],进一步确认这一地区有比 3.05 Ga 更加古老的基底存在。基底岩石从太古宙、古元古代至中元古代演化过程中有大量岩浆来源物质的加入,导致了古老大陆地壳的重新改造。

(2) 中太古代陆壳增生开始时期。早期与 Andorinhas 超群相伴的英云闪长岩型 TTG 岩套,与这一时期兴谷河地区广泛发育的混合岩化及 PGC 高级变质作用为同一时代,发生在(2 859±2) Ma^[5](U—Pb 测年)和(2 859±9) Ma^[8](U—Pb SHRIMP 测年)。指示 TTG 岩套来源于早期地幔部分熔融形成的拉斑玄武质岩石,其在变质到石榴石基性麻粒岩相或榴辉岩相的条件下,进一步熔融形成英云闪长质母岩岩浆,再经分离结晶作用产生。晚期的花岗闪长岩型

TTG 花岗片麻岩套构成了这一时期第二阶段的岩浆作用,其特点指示已经存在陆壳与洋壳的部分熔融,并发生了较强的混染作用,代表该区域演化变迁中原始岛弧物质的产生,其机制仍然受高度熔融的地幔柱构造所控制。在 2.87 Ga 时期,与地幔柱相关的热液事件使得软流圈地幔上涌, Serra Azul 等含科马提岩和拉斑玄武岩的杂岩是原始洋壳形成的标志,指示南美克拉通陆壳增生的开始时期。太古宙大陆地壳基底处升高的温度导致玄武岩壳的局部融化和年龄为 2.86 Ga 的奥长花岗岩的形成,同时伴随着英云闪长岩—奥长花岗岩在地壳浅层的部分熔融以及年龄为 2.86 Ga 的含钾淡色花岗岩的生成。

(3) 新太古代板块构造与成矿的重要时期。该时期是南美克拉通形成过程中一个比较完整的俯冲—增生过程,同碰撞时期广泛分布的 TTG 岩套和造山后崩塌的碱性至亚碱性系列花岗岩相继出现。在北部 ISB 和南部 RMGGT 间的过渡区域分布的铁镁质—超铁镁质岩体具有科马提岩的性质^[2],其成因也与早期板块构造相关。2.76~2.74 Ga 的年龄代表地壳重要的缩短事件与同构造岩浆活动的峰值^[12],也是强烈俯冲作用发生的时期。新太古代晚期这一地区发生重大矿化事件,后造山的拉张环境使铁镁质岩浆高度分异,为碱质岩浆源和流体运移提供了完美通道,或者由于钙碱性岩石脱水熔融形成含矿岩浆^[12],在这一地区形成了高度富集的 IOCG 矿床(群)、岩浆热液铜—金—钨—锡矿床和浅成低温热液型金—钼—铂矿床^[24]。2.68~2.57 Ga 是卡拉加斯中心走滑剪切带的形成与发展时期^[5],标志着南美地区克拉通化第一阶段的开始。第二期花岗质片麻岩为俯冲板片熔融过程中形成的 TTG 岩套^[13],反映了早期板块构造事件,指示新太古代卡拉加斯地区在 2 742~2 622 Ma 是一个板块构造从强烈俯冲转向伸展的转折时期,构成了一个比较完整的俯冲—增生过程,指示南美克拉通板块作用已经成为主导的地球动力学过程。

(4) 古元古代泛亚马孙(Trans Amazonian)造山运动形成新生地壳。这一时期以后构造花岗岩和过铝质钙碱性 S 型花岗岩为代表的陆源岩浆岩为主体^[25],但在本次研究中未涉及。古元古代的碱性非造山花岗岩—(环斑)花岗岩有明显的分馏作用过程,其原岩可能是中太古代—新太古代产生的岛弧花岗岩和火山岩,岩浆的形成过程明显有花岗岩和

火山岩的结晶,是太古宙地壳或地幔熔融和混合的结果^[37]。这一时期也是南美地区第二阶段的克拉通化过程,南美大陆最终固结形成多层结构的克拉通基底。

(5)中元古代—新元古代卡拉加斯地区产生了大量同褶皱期花岗岩和伟晶岩,侵入在前期基底岩石中,是该区域巴西利亚旋回花岗岩岩浆活动的开始,标志着南美克拉步入了克拉通被破坏的过程。

5.3 地壳演化机制对比

南美克拉通在古太古代陆核开始形成,中太古代古大陆增生,出现的 Serra Azul 等含科马提岩和拉斑玄武岩杂岩是原始洋壳的残留,也是南美克拉通陆壳形成的开始。新太古代是陆壳形成增生的主要时期,并出现了一个比较完整的俯冲—增生过程,在新太古代晚期板块构造从强烈俯冲转向伸展,岩浆成矿作用强烈,并在 2.5 Ga 左右开始初步克拉通化。古元古代南美地区发生第二阶段的克拉通化过程,碱性的非造山花岗岩—(环斑)花岗岩大量侵入,南美大陆最终固结形成多层结构的克拉通基底。中元古代—新元古代出现在南美地台西部巴西—玻利维亚之间的苏隆斯(Sunsas)造山运动,是罗迪尼亚大陆重组的构造标志^[1],南美克拉通步入了后期的克拉通被破坏过程,在新元古代末期被大量同褶皱期花岗岩和伟晶岩侵入。

巴西卡拉加斯地区的岩浆岩组成近似于我国前寒武纪早期的岩浆—热事件,其构造岩浆过程也与我国华北、塔里木等陆块的初期演化显示出相似的特征。华北克拉通是一个有约 3.8 Ga 漫长历史的古老克拉通,由多个微陆块组成,2.9~2.7 Ga 是陆壳最重要的形成时期,大规模条带状铁建造(banded iron formation, BIF)主要形成于新太古代晚期(2.55~2.50 Ga)^[26],在鞍本、冀东等典型地区出露的基底岩石主要为麻粒岩、片麻岩岩系和花岗岩—绿岩等岩石组合。2.9 Ga 的岩浆—热事件、分布广泛的新太古代早期岩石,以及克拉通多阶段的构造岩浆演化记录了几乎所有的地球早期发展的重大构造事件^[27]。第一期克拉通化发生在太古宙末期(2.60~2.53 Ga),华北克拉通东、西部陆块之间的古华北洋,在约 2 565~2 540 Ma 发生 NW 向的洋内俯冲,形成了五台原始岛弧,之后在 2 525~2 475 Ma 发生多阶段俯冲—增生作用,导致了五台弧后盆地的关闭和大量不同类型的岛弧岩浆的形成^[28]。微陆块被火山—沉积岩系焊接增

生,随后发生变质作用和花岗岩化,完成初步克拉通化过程后已经形成了现今规模的古陆^[27]。第二期克拉通化发生在古元古代末(1.95~1.82 Ga),华北克拉通东、西部陆块间发生了大规模的碰撞造山作用,形成了多阶段裂谷—俯冲—增生—碰撞的陆内造山演化,导致了华北中部造山带和华北克拉通前寒武纪基底的最终形成^[29]。至中元古代,华北克拉通进入稳定的演化阶段。

南美克拉通与华北克拉通的基底构造演化有许多共同点,但是两个克拉通基底仍然存在一些差异。如:南美克拉通基底杂岩形成时代(3.05~2.85 Ga)较华北克拉通总体较老,南美克拉通代表陆壳形成和生长的 TTG 岩套的年龄为 3.0~2.86 Ga,而华北克拉通的 TTG 岩套的年龄高峰期在 2.9~2.7 Ga,卡拉加斯地区形成典型的火山沉积岩序列的时间发生在 2.75~2.57 Ga,而华北克拉通在 2.6~2.5 Ga 间发生大规模的火山活动,初步克拉通化和大规模 BIF 的形成时间要晚 0.20~0.15 Ga。这种时间上的差异是南美克拉通、华北克拉通以及澳大利亚克拉通共同参与全球板块构造活动相互影响的结果^[30]。

南美克拉通的演化从古太古代陆核形成开始,中太古代出现原始岛弧的物质和古大陆增生,其成因可能与地幔柱相关,新太古代地幔隆升并导致下地壳部分熔融,俯冲板片熔融过程中形成的 TTG 岩套被火山—沉积岩系焊接增生,随后发生岩浆侵入、变质作用和成矿作用,最终完成稳定大陆的克拉通化过程。其构造机制反映早期受地幔柱构造控制,在晚期转换成以板块构造为主导的大陆增生机制。

6 结论

综合本次调查情况和研究成果,得出以下主要结论。

(1)卡拉加斯地区经历了多期不同组分的花岗质岩浆的侵入作用,分别形成中太古代的紫苏花岗岩、层状基性—超基性岩和 TTG 岩套,新太古代基性岩体—超基性岩杂岩、TTG 岩套、同构造花岗岩、后构造花岗岩,以及古元古代的碱性花岗岩系列。

(2)卡拉加斯地区中太古代—古元古代片麻岩和花岗岩大部分为高钾钙碱性系列,为准铝质钙碱性花岗岩—碱性 A 型花岗岩,少量为铁镁质—超铁

镁质岩石。岩浆物质大部分源自古老克拉通的基底,部分由原始地幔的基性岩浆分离结晶形成。

(3) 本文获得的岩体锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄主要集中在 2 899 ~ 2 831 Ma、2 742 ~ 2 622 Ma、1 919 Ma 3 个时期,岩浆侵入活动跨越中太古代—新元古代的岩浆发展阶段。

(4) 卡拉加斯地区的岩浆活动反映了南美克拉通自太古宙,经元古宙至古生宙的构造岩浆体系,岩浆作用指示古太古代陆核开始形成,中太古代古大陆增生、太古宙末期及古元古代二阶段的克拉通化过程,中元古代—新元古代克拉通开始被破坏。

(5) 南美克拉通前寒武纪早期的岩浆—热事件、构造岩浆演化与我国大陆华北、塔里木等陆块的初期演化具有相似的特征,但也存在一些差异。推测其构造机制可能在早期受地幔柱构造控制,在晚期转换成以板块构造为主导的大陆增生机制。

参考文献 (References):

- [1] Santos J O S, Hartmann L A, Gaudette H E, et al. A New understanding of the provinces of the Amazon Craton based on integration of field mapping and U – Pb and Sm – Nd geochronology [J]. *Gondwana Research*, 2000, 3 (4): 453 – 488.
- [2] Grainger C J, Groves D I, Tallarico F H B, et al. Metallogenesis of the Carajás mineral province, southern Amazon Craton, Brazil: Varying styles of Archean through Paleoproterozoic to Neoproterozoic base – and precious – metal mineralisation [J]. *Ore Geology Reviews*, 2008, 33 (3/4): 451 – 489.
- [3] 卢民杰, 朱小三, 郭维民. 南美安第斯地区成矿区带划分探讨 [J]. *矿床地质*, 2016, 35 (5): 1073 – 1083.
Lu M J, Zhu X S, Guo W M. Division of Andean metallogenic domain in South America [J]. *Mineral Deposits*, 2016, 35 (5): 1073 – 1083.
- [4] 曾勇, 郭维民, 姚春彦, 等. 巴西卡拉加斯地区基底杂岩的地质特征与时代约束 [J]. *中国地质*, 2017, 44 (4): 766 – 780.
Zeng Y, Guo W M, Yao C Y, et al. Geological features and age constraint of basement complex in Carajás province of Brazil [J]. *Geology in China*, 2017, 44 (4): 766 – 780.
- [5] Souza Z S, Potrel A, Lafon J M, et al. Nd, Pb and Sr isotopes in the Identidade Belt, an Archaean greenstone belt of the Rio Maria region (Carajás Province, Brazil): Implications for the Archaean geodynamic evolution of the Amazonian Craton [J]. *Precambrian Research*, 2001, 109 (3/4): 293 – 315.
- [6] Avelar V G, Lafon J M, Correia F C Jr, et al. O magmatismo arqueano da região de Tucumã – Província Mineral de Carajás: Novos resultados geocronológicos [J]. *Revista Brasileira de Geociências*, 1999, 29 (4): 453 – 460.
- [7] Moreto C P N, Monteiro L V S, Xavier R P, et al. Mesoarchean (3.0 and 2.86 Ga) host rocks of the iron oxide – Cu – Au Babaca deposit, Carajás Mineral Province: U – Pb geochronology and metallogenetic implications [J]. *Mineralium Deposita*, 2011, 46 (7): 789 – 811.
- [8] Pidgeon R T, Macambira M J B, Lafon J M. Th – U – Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: Evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite [J]. *Chemical Geology*, 2000, 166 (1/2): 159 – 171.
- [9] Feio G R L, Dall'Agnol R, Dantas E L, et al. Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: Implications for crustal evolution of the Carajás province, Amazonian craton, Brazil [J]. *Precambrian Research*, 2013, 227: 157 – 185.
- [10] Silva Leite A A, Dall'Agnol R, Macambira M J B, et al. Geologia e geocronologia dos granitóides arqueanos da região de Xinguará – PA e suas implicações na evolução do Terreno Granito – Greenstone de Rio Maria, cráton amazônico [J]. *Revista Brasileira de Geociências*, 2004, 34 (4): 447 – 458.
- [11] Mansur E T, Filho C F F. Magmatic structure and geochemistry of the Luanga Mafic – Ultramafic Complex: Further constraints for the PGE – mineralized magmatism in Carajás, Brazil [J]. *Lithos*, 2016, 266 – 267: 28 – 43.
- [12] Sardinha A S, de Mesquita Barros C E, Krymsky R. Geology, geochemistry, and U – Pb geochronology of the Archean (2.74 Ga) Serra do Rabo granite stocks, Carajás Metallogenetic Province, northern Brazil [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2006, 20 (4): 327 – 339.
- [13] Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An overview of adakite, tonalite – trondhjemite – granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution [J]. *Lithos*, 2005, 79 (1/2): 1 – 24.
- [14] 黎彤, 倪守斌. 中国大陆岩石圈的化学元素丰度 [J]. *地质与勘探*, 1997 (1): 31 – 37.
Li T, Ni S B. Element abundances of the continental lithosphere in China [J]. *Geology and Prospecting*, 1997 (1): 31 – 37.
- [15] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [16] 卢俊浩, 张达, 狄永军, 等. 赣东北船坑—铜山推覆构造及其与同构造成矿岩浆的关系 [J]. *中国地质调查*, 2016, 3 (3): 29 – 37.
Lu J H, Zhang D, Di Y J, et al. The relationship between thrust – fault and the syntectonic magmatism in Chuankeng – Tongshan, northeastern Jiangxi Province [J]. *Geological Survey of China*, 2016, 3 (3): 29 – 37.
- [17] 刘勇胜, 胡兆初, 李明, 等. LA – ICP – MS 在地质样品元素分析中的应用 [J]. *科学通报*, 2013, 58 (36): 3753 – 3769.
Liu Y S, Hu Z C, Li M, et al. Applications of LA – ICP – MS in the elemental analyses of geological samples [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58 (32): 3863 – 3878.

- [18] 李怀坤,耿建珍,郝爽,等. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICP MS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究[J]. 矿物学报,2009,29(S1):600-601.
Li H K, Geng J Z, Hao S, et al. The isotope age study of U-Pb in zircon through LA-MC-ICPMS[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009,29(S1):600-601.
- [19] 唐华,陈永东,魏龙,等. 冈底斯南缘拉隆地区变形花岗岩地质特征及其构造意义[J]. 中国地质调查,2020,7(4):85-94.
Tang H, Chen Y D, Wei L, et al. Geological characteristics and tectonic implications of the deformed granite in Lalong area in the southern margin of Gangdise[J]. Geological Survey of China, 2020,7(4):85-94.
- [20] Siepierski L, Filho C F F. Spinifex-textured komatiites in the south border of the Carajas ridge, Selva Greenstone belt, Carajás Province, Brazil[J]. Journal of South American Earth Sciences, 2016,66:41-55.
- [21] Torresi I, Xavier R P, Bortholoto D F A, et al. Hydrothermal alteration, fluid inclusions and stable isotope systematics of the Alvo 118 iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Mineral Province (Brazil): Implications for ore genesis[J]. Mineralium Deposita, 2012,47(3):299-323.
- [22] 曾勇,郭维民,姚春彦,等. 巴西卡拉加斯地区氧化铁型铜-金矿床研究进展[J]. 地质科技情报,2013,32(5):72-78.
Zeng Y, Guo W M, Yao C Y, et al. Research progress on iron oxide-Cu-Au deposit in Carajás, Brazil[J]. Geological Science and Technology Information, 2013,32(5):72-78.
- [23] 侯增谦. 大陆碰撞成矿论[J]. 地质学报,2010,84(1):30-58.
Hou Z Q. Metallogenesis of continental collision[J]. Acta Geologica Sinica, 2010,84(1):30-58.
- [24] 曾勇,郭维民,项红莉,等. 巴西卡拉加斯地区大规模铁-铜-金多金属矿床的成矿作用[J]. 矿床地质,2015,34(4):828-841.
Zeng Y, Guo W M, Xiang H L, et al. Massive Fe-Cu-Au poly-metallic deposits metallogenesis in Carajás mineral province of Brazil[J]. Mineral Deposits, 2015,34(4):828-841.
- [25] 沈莽庭,徐鸣,高天山,等. 巴西圣弗朗西斯科克拉通 Ibitiara 岩体的锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 世界地质,2020,39(1):1-15.
Shen M T, Xu M, Gao T S, et al. Zircon U-Pb geochronology, geochemical characteristics and geological implication of Ibitiara pluton from São Francisco Craton in Brazil[J]. Global Geology, 2020,39(1):1-15.
- [26] 万渝生,董春艳,颜炳强,等. 华北克拉通太古宙研究若干进展[J]. 地球学报,2015,36(6):685-700.
Wan Y S, Dong C Y, Xie H Q, et al. Some progress in the study of Archean basement of the North China Craton[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2015,36(6):685-700.
- [27] 翟明国. 华北克拉通的形成以及早期板块构造[J]. 地质学报,2012,86(9):1335-1349.
Zhai M G. Evolution of the North China Craton and early plate tectonics[J]. Acta Geologica Sinica, 2012,86(9):1335-1349.
- [28] 张传林,马华东,李怀坤,等. 塔里木北缘库鲁克塔格地区古元古界——祝贺芮行健先生 90 华诞[J]. 华东地质,2022,43(2):133-140.
Zhang C L, Ma H D, Li H K, et al. Paleoproterozoic in Quruqtagh terrane in Northern Tarim[J]. East China Geology, 2022,43(2):133-140.
- [29] 李三忠,李玺瑶,戴黎明,等. 前寒武纪地球动力学(VI):华北克拉通形成[J]. 地学前缘,2015,22(6):77-96.
Li S Z, Li X Y, Dai L M, et al. Precambrian geodynamics (VI): Formation of North China Craton[J]. Earth Science Frontiers, 2015,22(6):77-96.
- [30] 王天刚,郑璐,朱意萍,等. 澳大利亚前寒武纪超大陆演化与成矿作用[J]. 华东地质,2022,43(3):255-267.
Wang T G, Zheng L, Zhu Y P, et al. Precambrian supercontinent evolution and metallogeny of Australia[J]. East China Geology, 2022,43(3):255-267.

Magmatism and tectonic evolution of metamorphic basement in Carajás area of Brazil

ZENG Yong, LIU Yi, GUO Weimin, SHEN Mangting, XU Ming
(Nanjing Center, China Geological Survey, Jiangsu Nanjing 210016, China)

Abstract: The Archean metamorphic basement is developed in Carajás area of Brazil, which is one of the most abundant mineral deposits and the highest degree of resource accumulation deposits in the world. A large amount of charnockite, (trondhjemite-tonalite-granodiorite, TTG) rock series and metamorphic plutons that haven't completely disintegrated exist in the crystalline basement of Archean granite-greenstone, with large perception difference. The correct division and fine study of igneous rocks are important means to further understand the evolution of South American Craton. Based on the investigation of metamorphic basement intrusive rocks, and combined with previous data, the authors decomposed it into the charnockite of Paleoproterozoic, the mafic-ultramafic rocks

and the TTG gneiss suite of Mesoarchean, and the mafic – ultramafic rocks, the TTG gneiss suite, the syntectonic granite and the post – tectonic granite of Neoarchean, and the alkaline granite of Paleoproterozoic. The granitic plutons in Carajás area were comprehensively analyzed with geological, geochemical and geochronological methods. The $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ surface ages of granite by Zircon U – Pb method is concentrated in three periods: 2 899 ~ 2 831 Ma, 2 742 ~ 2 622 Ma and 1 919 Ma. After the formation of continental nucleus in Paleoarchean and continental hyperplasia in Mesoarchean, South America craton experienced two stage cratonic consolidation process in Late Archaean and Paleoproterozoic, and it began to destroyed in Mesoproterozoic and Neoproterozoic. Comparing the similarities and differences between North China Craton and South America Craton, the authors presumed that the mechanism of tectonic evolution was controlled by mantle plume tectonics in the early continental tectonics, and transformed into tectonics accretion mechanism dominated by plate motion. This research is beneficial to deepening knowledge and comparison of metallogenic process and its effects in ore concentrate area.

Keywords: granite; magmatism; tectonic evolution; Brazil; Carajás area

(责任编辑: 魏昊明)