



引文格式: 隰弯弯, 王天刚, 赵宇浩, 等. 巴西圣弗朗西斯科克拉通 Gaviao 地块 Jussiape 杂岩中太古代二长花岗岩的识别及其地质意义[J]. 西北地质, 2026, 59(4): 214–230. DOI: 10.12401/j.nwg.2025137

Citation: XI Wanwan, WANG Tiangang, ZHAO Yuhao, et al. Identification and Its Geological Significance of Mesoarchean Monzogranite in the Jussiape Complex of the Gaviao Block, Sao Francisco Craton, Brazil[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(4): 214–230. DOI: 10.12401/j.nwg.2025137

巴西圣弗朗西斯科克拉通 Gaviao 地块 Jussiape 杂岩 中太古代二长花岗岩的识别及其地质意义

隰弯弯, 王天刚*, 赵宇浩*, 沈莽庭, 孙建东, 徐鸣, 姚春彦

(中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016)

摘 要: Jussiape 杂岩是巴西圣弗朗西斯科克拉通 Gaviao 地块内古元古代重要的岩浆岩单元, 被认为由 Jussiape I 花岗岩 (2 121 Ma) 和 Jussiape II 正长花岗岩 (2 052 Ma) 构成。为了进一步厘清 Jussiape 杂岩的侵入时代、查明其岩体特征和对区域岩浆活动、构造背景及成矿的指示意义, 笔者对 Jussiape 花岗岩开展了岩石学、锆石 U–Pb 同位素年代学和 Lu–Hf 同位素研究, 在 Jussiape I 花岗岩内识别出了一组中太古代的二长花岗岩侵入岩, 其锆石 U–Pb 同位素年龄为 $(3\,108 \pm 22)$ Ma。SiO₂ 含量为 72.23%~72.50%, Al₂O₃ 含量为 14.68%~15.09%, TiO₂ 含量约为 0.24%, Na₂O 含量为 5.29%~5.66%, K₂O 含量小于 2%, K₂O/Na₂O 均值为 0.29, TFeO+MgO 均值为 2.42%; 具有较为明显的 Nb、Ta、P、Ti、Sr 负异常, Ni、Cr 等相容元素含量很低, Hf–Rb–Ta 图解显示其为碰撞大地构造背景下的花岗岩; 稀土元素配分曲线为较为平缓的右倾斜型, 轻稀土富集, La/Yb 值大于 15, 具 Ce、Eu 负异常。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -18.31~-0.53, 二阶段模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 为 3 523~4 063 Ma。这些地质特征指示 Jussiape 中太古代的二长花岗岩源于古老地壳物质循环再造, 其成岩受区域 Barra do Mendes–Joao Correa 线状构造控制, 是对中太古代 Gaviao 地块南部西侧岩浆弧活动的响应, 与区域中太古代短暂存在的自西向东的俯冲、碰撞造山大地构造背景一致。Barra do Mendes–Joao Correa 线状构造在古元古代持续活动, 控制或影响了 Jussiape I 花岗岩、Jussiape II 正长花岗岩和 Ibitiara 花岗闪长岩的侵位和展布, 构成了区内重要的构造–岩浆–成矿带, 具有 IOCG 型矿床 (铁氧化物铜–金矿床) 成矿潜力, 是 Gaviao 地块内该类型矿床勘查突破的关键区带。

关键词: Gaviao 地块; Jussiape 杂岩; 中太古代; Lu–Hf 同位素; IOCG 型矿床

中图分类号: P588.12; P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)04-0214-17

Identification and Its Geological Significance of Mesoarchean Monzogranite in the Jussiape Complex of the Gaviao Block, Sao Francisco Craton, Brazil

XI Wanwan, WANG Tiangang*, ZHAO Yuhao*, SHEN Mangting, SUN Jiandong, XU Ming, YAO Chunyan

收稿日期: 2025-04-21; 修回日期: 2025-11-15; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFC2901804), 中国地质调查局项目 (12120114002601) 联合资助。

作者简介: 隰弯弯 (1986–), 男, 高级工程师, 从事矿产勘查工作。E-mail: xww230@163.com。

* 通讯作者: 王天刚 (1983–), 男, 博士, 正高级工程师, 从事区域成矿规律研究。E-mail: wangtg1899@gmail.com。

赵宇浩 (1989–), 男, 博士, 高级工程师, 从事矿产地质调查工作。E-mail: zhao61060427@126.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

(Nanjing Center of China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: The Jussiape Complex developed in Gaviao Block of Sao Francisco Craton is composed by Jussiape I granite and Jussiape II syenogranite with intrusion ages of 2 121 Ma and 2 052 Ma respectively. In order to determination the intrusive age and petrological characteristics of the Jussiape Complex, and discuss the significance to regional magmatic activity, tectonic setting, and mineralization, petrology, zircon U–Pb isotope chronology, and Lu–Hf isotope studies of the jussiape granite are carried out. Finally, a group of mesoarchean monzogranite intrusions with zircon U–Pb isotopic age of $(3\ 108 \pm 22)$ Ma were identified in the jussiape I granite. Petrogeochemical date show that, the samples SiO_2 content is 72.23%–72.50%, Al_2O_3 content is 14.68%–15.09%, TiO_2 content is 0.24%, Na_2O content ranges from 5.29%–5.26%, K_2O content is less than 2% with $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ value is 0.29, the average value of $\text{TFeO}+\text{MgO}$ is 2.42%. The samples exhibit depletion in Nb, Ta, P, Ti, Sr, and compatible elements such as Ni and Cr, the Hf–Rb–Ta diagram shows a collision tectonic granite feature; The rare earth element distribution curve shows a relatively gentle right tilt type and the La/Yb ratio is greater than 15, with enrichment of LREE and negative Ce and Eu anomalies. Lu–Hf isotope analysis show that the $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value range from –18.31 to –0.53 and the value of T_{DM2} is 3 523–4 063 Ma, indicating that the Jussiape monzogranite originated from the recycling of ancient crustal materials and controlled by the Barra do Mendes–Joao Correa lineament which is responding to the magmatic arc activity in the west of the southern part of the Gaviao Block. It is consistent with the subduction and collisional orogeny tectonic background that briefly existed in the southern part of the Gaviao Block during the Mesoarchean. The Barra do Mendes–Joao Correa lineament reactivated during the period of 2.1–1.9 Ga, forming a series of granite bodies such as Jussiape I granite, Jussiape II syenogranite and Ibitiara granodiorite that spread in a NNW direction. It is the most important structural–magmatic–metallogenetic belt in the region and has potential for IOCG-type deposits.

Keywords: Gaviao block; Jussiape granite; Mesoarchean; Lu–Hf isotope; IOCG-type deposit

南美巴西圣弗朗西斯科克拉通(Sao Francisco Craton)由太古代陆核增生、拼贴形成,其主要形成演化阶段为古太古代至古元古代(Marinho et al., 1992; Noce, 1995; Teixeira et al., 1996; Bastos, 1998)。Gaviao 地块位于圣弗朗西斯科克拉通北部,是克拉通内太古代基底出露面积最大的陆块,也是南美最古老的陆块之一,因此成为研究南美板块原始地壳演化的关键区域(Bastos et al., 1998; Barbosa et al., 2004; Santos Pinto et al., 2012)。

在中国和巴西地质学家联合野外调查中,发现 Gaviao 地块内 Jussiape 杂岩是区内重要的火成岩岩组,由 Jussiape I 花岗岩和 Jussiape II 正长花岗岩构成,该杂岩体内后期岩浆活动较为强烈,常见大面积出露的中、基性岩脉,接触带可见绿帘石化和铁锰质矿化。由于区内的金、铁等矿产的形成和分布与该岩浆活动关系密切,因此,对 Jussiape 杂岩的研究至关重要。笔者通过岩石学、锆石 LA–ICP–MS U–Pb 定年和 Lu–Hf 同位素研究,揭示了 Jussiape 杂岩的侵入时

代及岩体特征,为 Gaviao 地块中太古代—古元古代的地质演化过程提供了年代学、地球化学、同位素等的约束。

1 地质背景

巴西圣弗朗西斯科克拉通最早由 Almeida (1967, 1977) 提出,克拉通内古老岩石的锆石 U–Pb 同位素年龄通常为 3.6~1.8 Ga (Barbosa et al., 2004, 2013; Santos Pinto et al., 2012; Medeiros et al., 2017), 岩石中还发现有大于 4.0 Ga 锆石颗粒 (Paquette et al., 2015), 说明冥古宙可能已存在具有一定面积和厚度的岩壳 (沈莽庭等, 2020)。巴伊亚州的圣弗朗西斯科克拉通基底主要由 4 个构造单元组成 (图 1), 主要出露在巴伊亚州东部, 分别为 Itabuna–Salvador–Curaca 褶皱构造带、Serrinha 地块、Jequie 地块和 Gaviao 地块。这 4 个构造单元在古元古代的造山活动 (2.1~2.0 Ga) 中相互碰撞、拼贴, 导致了区域地壳的加厚和广泛的高级区域变质

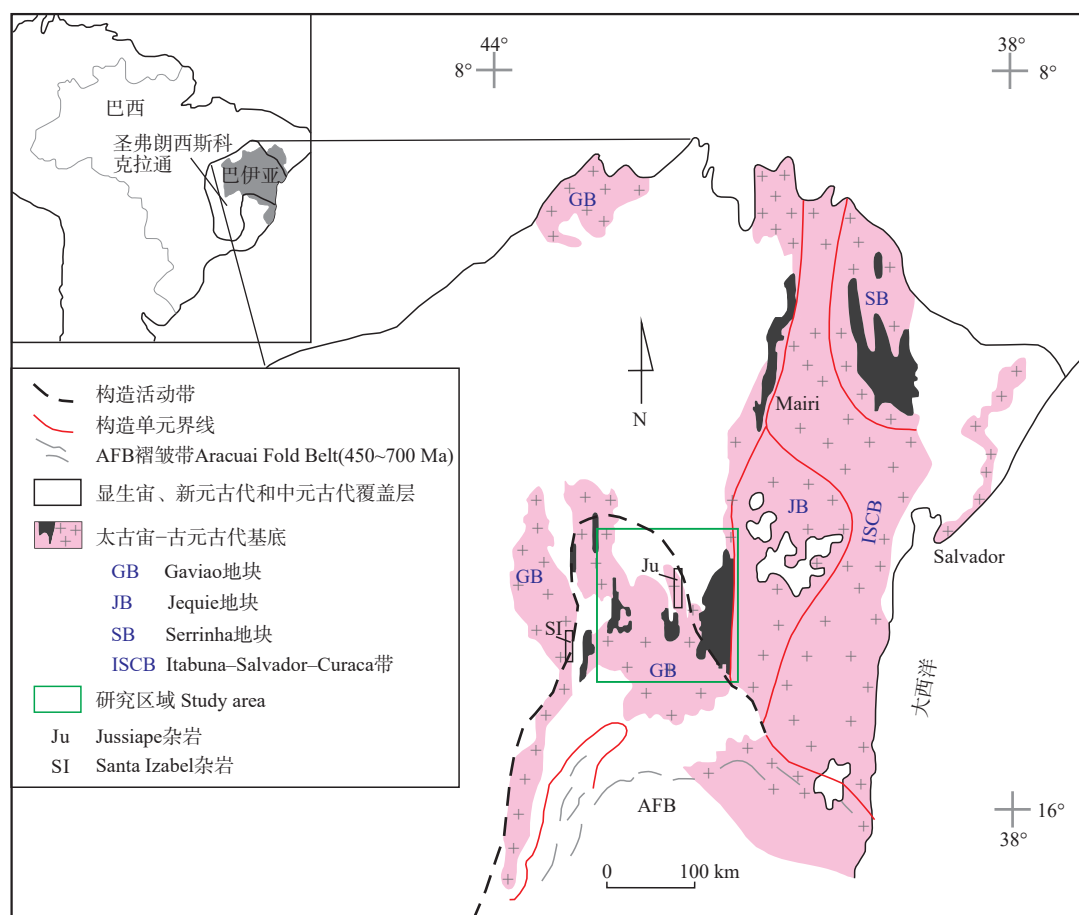


图1 圣弗朗西斯科克拉通地质简图(据 Santos Pinto et al., 2012; Cruz et al., 2016; Medeiros et al., 2017)

Fig. 1 Schematic geological map showing the limits, marginal fold belts and major structural units of the Sao Francisco Craton

作用(Barbosa et al., 2002, 2004; Delgado et al., 2003; Santos Pinto et al., 2012)。

Gaviao 地块位于 Itabuna-Salvador-Curaca 褶皱构造带和 Jequie 地块西侧, 呈不规则状南北纵贯巴伊亚州, 主要由奥长花岗岩-英云闪长岩-花岗闪长岩(TTG)组合、片麻岩、角闪岩、角闪岩相的英云闪长质和花岗闪长质正片麻岩组成, 地块内包含一些南美洲最古老的岩石, 年龄为 3.6~2.8 Ga(Medeiros et al., 2017), 圣弗朗西斯科克拉通内目前发现的一颗最古老的锆石即位于该地块南部(4 096 Ma; Paquette et al., 2015)。本次研究的 Jussiapé 杂岩位于 Gaviao 地块南部。区内岩石单元主要为: 克拉通陆核以古太古代灰色片麻岩、混合岩和 TTG 岩组(Sete Voltas、Boa Vista、Bernada 和 Aracatu 等)为主; 中太古代、新太古代及古元古代花岗岩类侵入其中; 新太古代变质火山沉积层序主要分布在陆核东西边缘; 区域北侧和西侧覆盖中元古代以来的硅质碎屑岩、碳酸盐岩等沉积盖层(图 2)。区内岩石单元年龄主要分为 4 个时期: 古太古代 TTG 岩组

集中在 3.4~3.2 Ga, 中太古代、新太古代及古元古代花岗岩类主要集中在 3.2~3.1 Ga、2.8~2.5 Ga 及 2.1~1.9 Ga(Santos Pinto et al., 2012; Cruz et al., 2016; Medeiros et al., 2017; Campos et al., 2021; 表 1, 图 2)。

Gaviao 地块是圣弗朗西斯科克拉通最重要的矿产分布区块之一, 地块内矿床成矿时代跨度较大, 从古太古代一直持续至早古生代。矿种类型较多, 主要有金矿、铬铁矿、铅锌矿、锰矿、铜矿、铁矿、铁钛钒矿、镍矿、铀矿、磷矿、金刚石矿、祖母绿矿、菱镁矿-滑石矿等。地块内成矿作用大致可以分为 4 期: ①太古宙锌-铜-菱镁-滑石-铅锌-铁-锰-钒钛铁成矿作用, 这些矿床的成矿作用都发生在圣弗朗西斯科克拉通形成以前; ②古元古代金-铬铁-镍-祖母绿成矿作用, 这个时期形成的矿床主要有金矿、铬铁矿、镍矿和祖母绿矿, 主要矿床形成时代集中在 2.2~1.9 Ga, 与圣弗朗西斯科克拉通各地块碰撞拼贴构造背景一致, 该时期目前已知的金矿床多为造山带型金矿; ③中新元古代铀-磷-金刚石成矿作用; ④新元古代至早古生代

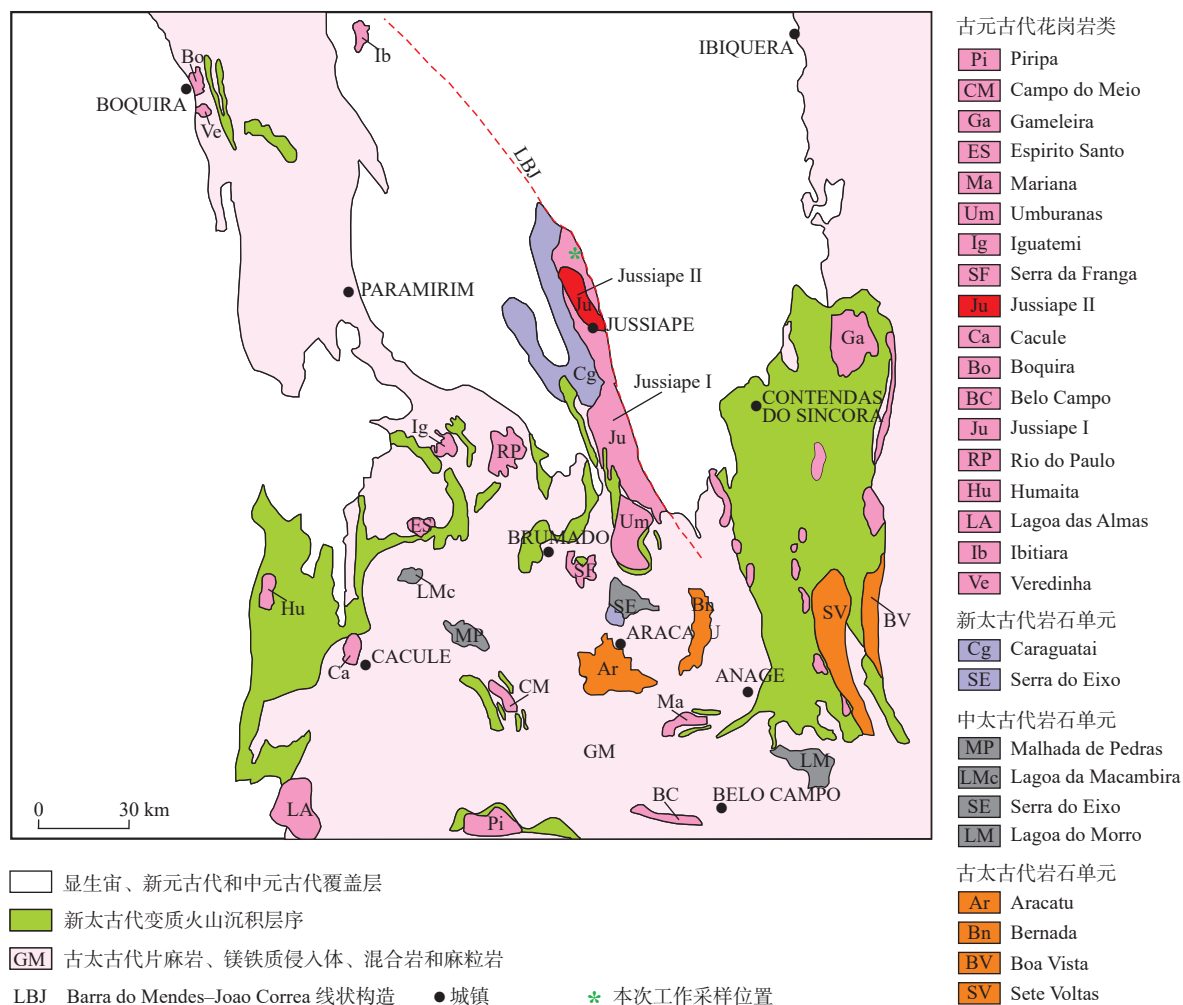


图2 研究区地质简图(据 Santos Pinto et al., 2012; Cruz et al., 2016; Campos et al., 2021)

Fig. 2 Simplified geological map of the studied area

锰-金刚石-金成矿作用, 该时期浅成低温热液型金矿床(点)较为普遍(徐鸣等, 2017; Campos et al., 2021)。

2 岩体特征及样品采集

Jussiape 杂岩位于 Gaviao 地块南部 Umburanas-Brumado-Aracatu 地区, 由 Jussiape I 花岗岩和 Jussiape II 正长花岗岩构成(图 2), 和其 NW 的 Ibitiara 花岗岩是 Gaviao 地块内代表性同期(2.1~1.9 Ga)花岗岩单元(Cruz et al., 2016; Campos et al., 2021)。杂岩东侧和北侧为中新元古代未变形变质的砂岩盖层, 南侧和西侧分别为 Gaviao 地块的片麻岩、Umburanas 花岗岩和 Caraguatai 正长岩(图 2)。Jussiape 杂岩周边区域分布许多铜、金矿床(点), 并见有次生水晶矿、金刚石砂矿和重晶石矿(化)点分布(沈莽庭等, 2020)。

本次野外观测的 Jussiape 岩体露头位于 NW 端

Jussiape I 花岗岩内, 长超过 1 km, 主要沿河谷及两侧路壁分布, 其岩性特征与南部及中部明显不同(斜长石含量明显增多)。样品手标本弱风化, 呈深灰-灰白色, 结合镜下观察显示岩石为中粗粒半自形粒状结构, 块状构造。矿物成分主要为斜长石、钾长石、石英等。斜长石约为 40%, 钾长石约为 20%, 均呈自形-半自形板片状、宽板状, 长约为 2~5 mm, 钾长石粒径一般稍大于斜长石。石英含量为 25%, 呈不规则粒状, 粒径多为 1~3 mm, 石英颗粒均发生碎裂重结晶, 表现为形态、粒度各不相同的微、细粒石英集合体。长石边部、裂纹中也多已绢云母化, 表现为细小的绢云母集合体, 暗色矿物主要为黑云母, 呈微细鳞片状, 暗色矿物分布具有定向性(图 3), 定名为二长花岗岩。

为了进一步揭示 Jussiape 二长花岗岩侵入时代及地球化学特征, 对其进行了同位素测年、地球化学分析(锆石测年和 Lu-Hf 同位素分析样品编号为 4200;

表 1 研究区内主要岩石单元年代学数据

Tab. 1 Geochronological data for rocks of the studied area

岩组名称	岩石类型	锆石 U-Pb 年龄 (Ma)	Nd 模式年龄 (Ga)	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	参考文献
Sete Voltas	花岗片麻岩	3 394±22	3.7	-1~-3	Santos Pinto et al., 2012
	英云闪长岩	3 403±5	—	—	Santos Pinto et al., 2012
Boa Vista	花岗闪长岩	3 243±26	3.75	-3.1	Santos Pinto et al., 2012
	花岗片麻岩	3 353±5	3.5~3.2	—	Santos Pinto et al., 2012; Medeiros et al., 2017
Bernada	花岗闪长岩	3 386±9	3.5~3.3	3.7	Santos Pinto et al., 2012; Medeiros et al., 2017
Aracatu	奥长花岗岩	3 325±16	—	-0.7	Santos Pinto et al., 2012
Lagoa do Morro	花岗闪长岩	3 184±6	3.6~3.3	—	Medeiros et al., 2017
Serra do Eixo	二长花岗岩	3 158±10	3.29	0.2	Santos Pinto et al., 2012
	碱性花岗岩	2 524±14~2 656±10	3.28	-3	Santos Pinto et al., 2012
Lagoa da Macambira	花岗岩	3 146±24	3.34	-1.5	Santos Pinto et al., 2012
Caraguatai	正长岩	2 696±5	3.22~3.5	-4~-5.8	Santos Pinto et al., 2012
Veredinha	二长花岗岩	2 113±11	—	—	Cruz et al., 2016
Ibitiara	花岗闪长岩	2 103±8	—	—	沈莽庭等, 2020
Lagoa das Almas	花岗闪长岩	2 114±24	—	—	Cruz et al., 2016
Humaita	花岗闪长岩	2 140±9	2.76	-4	Cruz et al., 2016
Rio do Paulo	花岗岩	2 324±6	2.73	—	Cruz et al., 2016; Medeiros et al., 2017
Jussiape I	花岗岩	2 122±2.2	—	—	Cruz et al., 2016
Belo Campo	花岗闪长岩	2 049±23	3.28	-15.4	Cruz et al., 2016
Boquira	黑云二长花岗岩	2 041±23	—	—	Cruz et al., 2016
Cacule	花岗岩	2 019±32	—	—	Cruz et al., 2016
Jussiape II	正长花岗岩	2 052±44	3.25	-10	Cruz et al., 2016
Serra da Franga	二长花岗岩	2 039±22	—	—	Cruz et al., 2016
Iguatemi	花岗岩	2 058±72	3.46	-13.4	Cruz et al., 2016; Medeiros et al., 2017
Mariana	花岗岩	1 944±14	3.45	-10	Cruz et al., 2016
Espirito Santo	花岗岩	2 023±26	3.05	-11.1	Cruz et al., 2016
Gameleira	花岗岩	1 947±54	2.6	-8.8	Cruz et al., 2016
Campo do Meio	花岗岩	2 012±4	—	—	Cruz et al., 2016
Pirip	花岗岩	1 871±180	—	—	Cruz et al., 2016

注：—表示无数据。

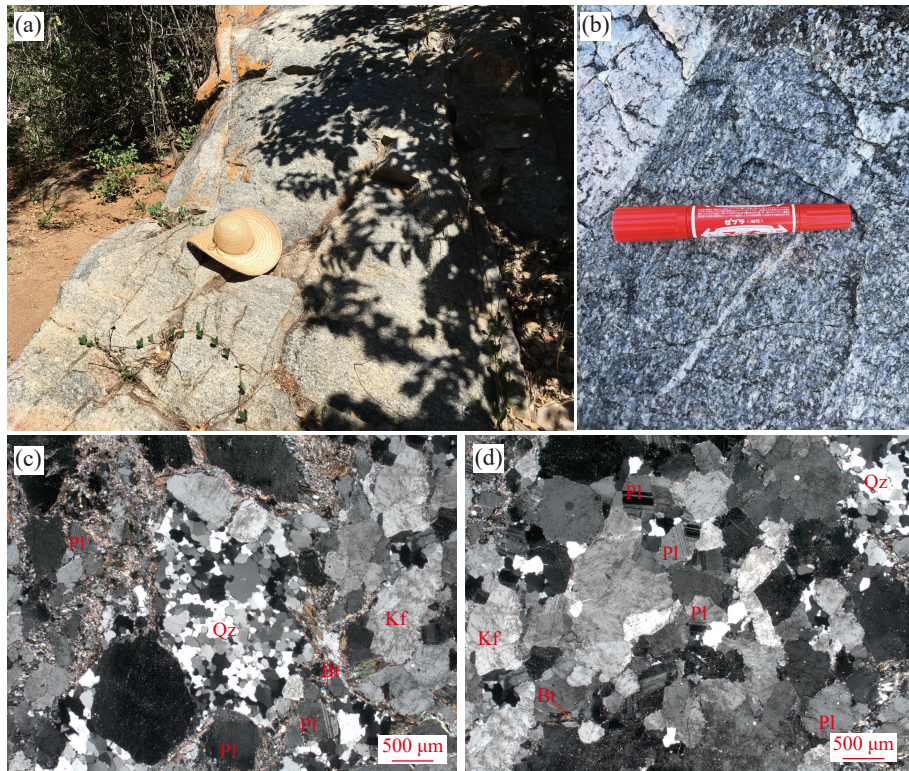
地球化学样品编号为 4200-YQ1, 4200-YQ2 和 4200-YQ3; 采样坐标为 W -41°33'47.71", N 13°21'27.75")

3 分析方法

样品锆石的分选、制靶和锆石阴极发光(CL)照相在河北省诚信地质服务有限公司完成。锆石 U-Pb 年龄测试在中国地质调查局天津地质调查中心实验室完成, 测试仪器为激光剥蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICP MS)。采用中国地质大学刘勇胜博士研发的 ICPMSDataCal 程序(Liu et al., 2010)和

Ludwig(2003)的 Isoplot 程序进行数据处理, 采用²⁰⁴Pb 校正法或者 Anderson(2002)的方法对普通铅进行校正。

锆石 Lu-Hf 同位素分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成, 测试点对应锆石测年分析点。模式年龄的计算以球粒陨石¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf=0.282 772, ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf=0.033 2(Blichert Toft et al., 1997), 亏损地幔 Hf 模式年龄(T_{DM1})采用¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf=0.283 25, ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf=0.038 4 计算(Griffin et al., 2000)。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 计算采用的¹⁷⁶Lu 的衰变常数为 $1.867 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ (Soderlund et al., 2004), 二阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2})采用平均大陆壳¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf=0.015 计算(Griffin et al., 2002), 计算有关公



Pl. 斜长石; Kf. 钾长石; Qz. 石英; Bt. 黑云母

图3 Jussiape 二长花岗岩野外露头(a、b)和镜下照片(c、d)

Fig. 3 The characteristics of Jussiape monzogranite

式参见吴福元等(2007)。

本次采集的 Jussiape 二长花岗岩 3 件样品(4200-YQ1、4200-YQ2、4200-YQ3)在广州澳实分析检测有限公司进行全岩、主微量元素分析测试。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Jussiape 二长花岗岩的锆石晶体具一定程度的碎裂, 部分晶体形态较好, 呈短柱状, 长宽比多 2:1 左右, 一般不超过 3:1, CL 图像可见清晰的岩浆振荡环带(图 4)。锆石 CL 图像整体偏暗, 稍亮着 U、Th 含量相对较低, 锆石 U、Th 含量变化范围分别为 $42 \times 10^{-6} \sim 1\,271 \times 10^{-6}$ 和 $30 \times 10^{-6} \sim 1\,455 \times 10^{-6}$, U、Th 含量变化范围较大(表 2)。Th/U 值为 0.16~2.24, 平均为 0.62, 结合其锆石较好的岩浆环带(何俊等, 2024), 显示其为岩浆成因(谢应波等, 2024; 胡运行等, 2025)。

将测得的测年数据利用 Isoplot 3.75 绘制锆石年龄谐和曲线, 数据点 18、31 和 33 明显偏离谐和曲线和不一致线, 因此将这 3 个数据予以剔除。剩余的 48

个数据除少数几个沿着谐和曲线外, 大多数偏离谐和曲线, 但呈直线排列, 拟合形成不一致线, 表明该样品的锆石在形成之后遭受了区域变质或热液作用, 导致铅丢失; 48 个数据点拟合的不一致线与谐和曲线的上交点表示锆石形成时的年龄(陈岳龙等, 2004; 王一丁, 2022), 其值为 $(3\,108 \pm 22)$ Ma(图 4), 代表了 Jussiape 二长花岗岩的形成年龄, 为中太古代侵入的岩体。

4.2 锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

笔者对 Jussiape 二长花岗岩 51 颗锆石进行了原位 Lu-Hf 同位素分析, 对应 U-Pb 同位素分析数据剔除 18、31 和 33 号异常数据点。锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为 $0.280\,712 \sim 0.280\,861$, 平均为 $0.280\,795$, 对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-18.31 \sim -0.53$, 平均为 -9.37 , 单阶段模式年龄 T_{DM1} 集中在 $3\,351 \sim 3\,512$ Ma, 二阶段模式年龄 T_{DM2} 集中在 $3\,523 \sim 4\,063$ Ma(表 3)。在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) - t$ 图解中(图 5), Jussiape 花岗岩落在 $3.5 \sim 4.0$ Ga 大陆地壳演化线间, 位于球粒陨石演化线之下。

4.3 元素地球化学分析结果

Jussiape 二长花岗岩 3 件样品(4200-YQ1、4200-YQ2、4200-YQ3)主微量分析结果(表 4)显示, SiO_2 含

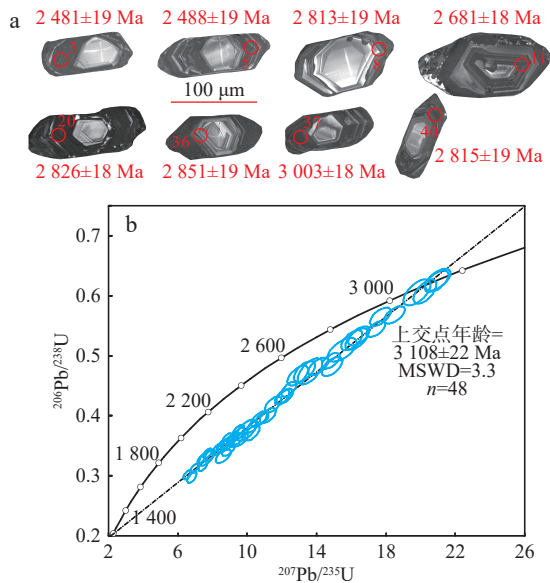


图4 Jussiape 二长花岗岩锆石 CL 图像(a)及 U-Pb 年龄(b)

Fig. 4 (a) Cathodoluminescence images and (b) U-Pb age of zircons from Jussiape monzogranite

量为 72.23%~72.50%, Al_2O_3 含量为 14.68%~15.09%, K_2O 含量为 1.47%~1.78%, Na_2O 含量为 5.29%~5.66%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 平均值为 0.29。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(图 6a)中, Jussiape 二长花岗岩落入中钾钙碱性系列区域。

Jussiape 二长花岗岩微量元素中具有较为明显的 Nb、Ta、P、Ti、Sr 负异常(图 7), Ni、Cr 等相容元素含量很低(Ni : $2.6 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-6}$, Cr : $11 \times 10^{-6} \sim 19 \times 10^{-6}$), 在 Hf-Rb-Ta 图解中靠近“碰撞大地构造背景花岗岩”(图 6b)。Jussiape 二长花岗岩稀土元素总量为 $187.7 \times 10^{-6} \sim 518.3 \times 10^{-6}$, 轻重稀土比值 LREE/HREE 为 10.66~30.02, La/Yb 值 45.39~63.75。在稀土元素球粒陨石标准化配分曲线中(图 7), Jussiape 二长花岗岩表现为较为平缓的右倾斜型, 具有一定的 Ce、Eu 负异常。

5 讨论

5.1 杂岩体年代学讨论

Jussiape 杂岩在区域侵入岩单元中研究程度相对较高, 前人进行过 1:25 000 比例尺的地质调查工作, 识别出 Jussiape I 花岗岩(锆石 U-Pb 年龄为 2 121 Ma)和 Jussiape II 正长花岗岩(锆石 U-Pb 年龄为 2 052 Ma)两组岩体(Guimaraes et al., 2005; Cruz et al., 2016; 表 1, 图 2)。本次研究的 Jussiape 二长花岗岩的锆石 U-Pb 同位素测年结果与此前划归的古元古代的两组侵入

岩的侵入时代有较大的差异。据文中测年数据, Jussiape 二长花岗岩为中太古代时期侵入岩(3 108 Ma)。Jussiape 二长花岗岩与南部出露的 Serra do Eixo 杂岩(由不同时代的二长花岗岩和碱性花岗岩组成; 表 1, 图 2)中的二长花岗岩(锆石 U-Pb 年龄 3 158 Ma)同属 3.2~3.1 Ga 期间侵入的钙碱性花岗质岩体, 具有十分相似的主量元素组成, 其主量、稀土元素含量及分馏特征等多介于 Serra do Eixo 二长花岗岩和 Serra do Eixo 碱性花岗岩之间(Santos Pinto et al., 1998, 2012; Barbosa et al., 2002; 表 1、表 5, 图 2)。

Serra do Eixo 二长花岗岩 Sm-Nd 模式年龄为 3.29 Ga, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 0.2, Serra do Eixo 碱性花岗岩 Sm-Nd 模式年龄为 3.28 Ga, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -3。Santos Pinto et al.(2012)研究发现, Serra do Eixo 二长花岗岩岩浆来源于古老地壳部分熔融(古太古宙灰色片麻岩部分熔融)或新生地壳熔融混染(含石榴子石角闪岩部分熔融与古老地壳物质混染), Serra do Eixo 碱性花岗岩岩浆则来源于古老地壳部分熔融(早期 Serra do Eixo 花岗片麻岩部分熔融)。Medeiros et al.(2017)年进一步对 Gaviao 地块南部中太古代岩体进行了综合研究, 认为 Gaviao 地块南部区域东侧岩体 Sm-Nd 模式年龄多 3.69~3.34(如 Lagoa do Morro 花岗闪长岩; 表 1, 图 2), 相应的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -1.5~-5.6, 指示了区域古太古代基底在中太古代的循环再造, 而 Gaviao 地块南部区域西侧岩体, 以 Santa Isabel 杂岩(图 1)为代表, Sm-Nd 模式年龄为 3.3~3.1 Ga(锆石 U-Pb 年龄为 3.1~2.9 Ga), 相应的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-1.4、-1.3 和 0.3)指示了岩浆源区短暂的地壳居留时间和新生地壳熔融混染的特征, 而其他 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-4.7)则指示了古老地壳物质的加入。

5.2 岩浆源区及岩石成因讨论

Jussiape 二长花岗岩 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值除 6 号测点为 0.002 116, 其余值均低于 0.002, 说明锆石在岩体形成之后的演化过程中有较少的放射成因的 Hf 积累, 因此可以用锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值解释岩体形成时的成因信息。其 Hf 同位素处在亏损地幔和 4.0 Ga 地壳演化线之间, 位于球粒陨石 Hf 同位素演化线之下(图 5), 一、二阶段的 Hf 模式年龄分别为 3 351~3 512 Ma 和 3 523~4 063 Ma, 老于其成岩年龄 3 108 Ma, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值(-18.31~-0.53), 表明 Jussiape 二长花岗岩源区以地壳 Hf 同位素为主导(郑永飞等, 2007; 彭璇等, 2022; 王志强等, 2024)。结合 Santos Pinto et al.(2012)和 Medeiros et al.(2017)的研究成果, 认为其岩浆应来

表2 Jussiape 二长花岗岩锆石 U-Pb 同位素测年数据

Tab. 2 Result of zircon U-Pb isotope analyses of Jussiape monzogranite

点号	含量 (10^{-6})		Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)	
	U	Th		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ
1	233	168	0.72	0.298 8	0.004 2	6.788 9	0.112 7	0.164 8	0.002 1	2 505	22
2	318	151	0.48	0.394 9	0.005 3	10.666 8	0.188 7	0.195 9	0.002 3	2 793	19
3	667	210	0.31	0.327 8	0.003 2	7.341 3	0.094 6	0.162 4	0.001 8	2 481	19
4	562	223	0.40	0.444 6	0.005 1	12.381 0	0.175 9	0.202 0	0.002 2	2 842	18
5	332	211	0.64	0.401 0	0.005 2	11.176 3	0.187 9	0.202 1	0.002 3	2 844	19
6	370	70	0.19	0.343 5	0.004 0	8.884 7	0.146 4	0.187 6	0.002 2	2 721	20
7	410	304	0.74	0.382 2	0.003 9	10.275 2	0.134 0	0.195 0	0.002 2	2 785	18
8	313	129	0.41	0.419 3	0.005 4	11.470 6	0.194 3	0.198 4	0.002 3	2 813	19
9	418	110	0.26	0.333 3	0.004 7	8.597 2	0.177 7	0.187 1	0.002 4	2 717	21
10	662	377	0.57	0.360 4	0.004 9	9.478 6	0.219 1	0.190 7	0.002 6	2 748	22
11	633	99	0.16	0.363 6	0.003 8	9.178 2	0.122 1	0.183 1	0.002 0	2 681	18
12	137	70	0.51	0.607 5	0.008 2	20.224 8	0.269 3	0.241 5	0.003 0	3 130	19
13	747	187	0.25	0.337 8	0.003 5	7.691 1	0.105 0	0.165 1	0.001 9	2 509	19
14	132	104	0.79	0.624 6	0.007 3	20.897 2	0.280 5	0.242 6	0.002 7	3 137	18
15	226	104	0.46	0.482 8	0.006 0	14.069 1	0.232 1	0.211 3	0.002 4	2 916	19
16	149	83	0.56	0.528 4	0.007 3	16.298 2	0.266 6	0.223 7	0.002 5	3 007	18
17	282	135	0.48	0.431 7	0.005 0	12.006 1	0.165 8	0.201 7	0.002 3	2 840	18
18	626	588	0.94	0.075 2	0.000 7	0.590 1	0.007 6	0.056 9	0.000 6	489	25
19	381	123	0.32	0.350 3	0.004 0	8.516 0	0.122 8	0.176 3	0.002 0	2 619	19
20	247	87	0.35	0.372 2	0.005 2	10.261 9	0.174 8	0.200 0	0.002 3	2 826	18
21	292	312	1.07	0.482 6	0.006 5	14.871 9	0.243 3	0.223 5	0.002 5	3 006	18
22	682	398	0.58	0.302 0	0.003 1	6.520 3	0.090 2	0.156 6	0.001 8	2 419	19
23	368	311	0.84	0.432 8	0.004 9	12.133 3	0.195 1	0.203 3	0.002 4	2 853	19
24	552	209	0.38	0.375 4	0.004 0	9.476 1	0.133 5	0.183 1	0.002 1	2 681	19
25	206	100	0.49	0.474 6	0.009 0	13.592 6	0.288 9	0.207 7	0.002 3	2 888	18
26	82	93	1.13	0.376 4	0.007 1	9.920 8	0.239 5	0.191 2	0.002 7	2 752	23
27	160	164	1.03	0.565 5	0.006 3	17.658 3	0.244 8	0.226 5	0.002 5	3 027	18
28	168	128	0.76	0.627 1	0.007 5	20.973 6	0.299 9	0.242 6	0.002 7	3 137	18
29	112	134	1.19	0.545 1	0.005 4	17.391 7	0.225 0	0.231 4	0.002 6	3 062	18
30	67	150	2.24	0.526 3	0.006 9	16.006 2	0.247 6	0.220 6	0.002 5	2 985	18
31	568	387	0.68	0.425 1	0.004 4	9.836 5	0.139 7	0.167 8	0.002 0	2 536	20
32	291	159	0.55	0.467 4	0.006 7	12.895 1	0.243 3	0.200 1	0.002 4	2 827	19
33	1 271	1 455	1.14	0.057 8	0.000 6	0.879 8	0.012 5	0.110 4	0.001 3	1 806	21
34	520	97	0.19	0.362 1	0.003 7	8.835 6	0.123 1	0.177 0	0.002 0	2 625	19
35	1 024	208	0.20	0.312 8	0.003 2	6.931 6	0.091 8	0.160 7	0.001 8	2 463	19
36	282	105	0.37	0.474 2	0.007 1	13.280 3	0.249 3	0.203 1	0.002 3	2 851	19
37	217	97	0.45	0.533 4	0.006 5	16.409 6	0.253 2	0.223 1	0.002 5	3 003	18

续表 2

点号	含量 (10 ⁻⁶)		Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)	
	U	Th		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ
38	679	176	0.26	0.344 2	0.003 9	8.255 6	0.125 7	0.174 0	0.002 0	2 596	19
39	496	233	0.47	0.432 6	0.005 3	12.096 7	0.208 0	0.202 8	0.002 4	2 849	19
40	447	238	0.53	0.395 7	0.004 0	10.839 4	0.149 1	0.198 7	0.002 3	2 815	19
41	607	804	1.32	0.317 7	0.003 8	7.433 3	0.107 8	0.169 7	0.001 9	2 555	19
42	350	161	0.46	0.361 8	0.003 9	9.443 6	0.130 4	0.189 3	0.002 2	2 736	19
43	109	81	0.74	0.510 4	0.008 1	15.454 0	0.342 3	0.219 6	0.002 8	2 978	20
44	42	30	0.72	0.605 8	0.008 8	19.766 6	0.318 0	0.236 6	0.002 8	3 098	19
45	143	175	1.23	0.568 5	0.005 9	18.470 8	0.243 4	0.235 6	0.002 6	3 091	18
46	440	283	0.64	0.348 7	0.004 1	8.586 3	0.133 6	0.178 6	0.002 1	2 640	19
47	532	372	0.70	0.370 4	0.004 2	9.493 1	0.137 8	0.185 9	0.002 1	2 706	18
48	606	255	0.42	0.334 1	0.003 9	7.810 1	0.126 7	0.169 6	0.002 0	2 553	20
49	318	282	0.89	0.491 9	0.005 4	14.793 7	0.212 7	0.218 1	0.002 5	2 967	18
50	630	258	0.41	0.354 4	0.004 9	8.856 3	0.159 0	0.181 2	0.002 1	2 664	19
51	606	139	0.23	0.330 2	0.005 3	7.613 4	0.173 9	0.167 2	0.002 1	2 530	21

注：表中所列误差均为1σ误差。

表 3 Jussiape 二长花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Tab. 3 Result of zircon Lu-Hf isotope analyses of Jussiape monzogranite

点号	年龄 (Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	T _{DM1} (Ma)	T _{DM2} (Ma)
1	2 505	0.052 713	0.000 274	0.001 928	0.000 006	0.280 838	0.000 025	-68.38	-15.51	3 429	3 946
2	2 793	0.031 648	0.000 372	0.001 207	0.000 013	0.280 797	0.000 021	-69.84	-9.35	3 421	3 791
3	2 481	0.032 490	0.000 203	0.001 173	0.000 007	0.280 807	0.000 020	-69.49	-15.88	3 404	3 950
4	2 842	0.029 782	0.000 520	0.001 038	0.000 016	0.280 787	0.000 019	-70.20	-8.27	3 419	3 764
5	2 844	0.029 747	0.000 697	0.001 146	0.000 027	0.280 803	0.000 020	-69.62	-7.86	3 407	3 740
6	2 721	0.055 158	0.000 354	0.002 116	0.000 015	0.280 861	0.000 019	-67.58	-10.36	3 415	3 798
7	2 785	0.024 609	0.000 311	0.000 892	0.000 010	0.280 780	0.000 016	-70.45	-9.54	3 416	3 797
8	2 813	0.036 819	0.000 335	0.001 375	0.000 011	0.280 829	0.000 019	-68.71	-8.07	3 392	3 730
9	2 717	0.024 466	0.000 185	0.000 902	0.000 006	0.280 774	0.000 019	-70.66	-11.31	3 425	3 852
10	2 748	0.047 185	0.000 230	0.001 745	0.000 012	0.280 846	0.000 018	-68.12	-9.61	3 403	3 773
11	2 681	0.036 911	0.000 452	0.001 296	0.000 020	0.280 789	0.000 016	-70.12	-12.28	3 439	3 883
12	3 130	0.024 488	0.000 451	0.000 918	0.000 016	0.280 798	0.000 018	-69.82	-1.13	3 394	3 554
13	2 509	0.035 830	0.001 311	0.001 280	0.000 046	0.280 817	0.000 017	-69.15	-15.10	3 401	3 924
14	3 137	0.022 631	0.000 640	0.000 792	0.000 021	0.280 802	0.000 016	-69.66	-0.53	3 377	3 523
15	2 916	0.030 059	0.000 263	0.001 116	0.000 009	0.280 843	0.000 017	-68.22	-4.78	3 351	3 609
16	3 007	0.028 540	0.000 719	0.001 035	0.000 027	0.280 790	0.000 017	-70.08	-4.42	3 415	3 658
17	2 840	0.024 272	0.000 101	0.000 862	0.000 004	0.280 785	0.000 013	-70.28	-8.05	3 407	3 749
19	2 619	0.026 664	0.000 428	0.000 951	0.000 015	0.280 808	0.000 017	-69.45	-12.38	3 383	3 842
20	2 826	0.028 148	0.000 496	0.000 972	0.000 013	0.280 787	0.000 016	-70.21	-8.52	3 414	3 767

续表 3

点号	年龄 (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2 σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2 σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2 σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$T_{\text{DM2}}(\text{Ma})$
21	3 006	0.038 495	0.000 604	0.001 397	0.000 028	0.280 814	0.000 019	-69.24	-4.34	3 415	3 652
22	2 419	0.044 784	0.000 891	0.001 662	0.000 035	0.280 800	0.000 022	-69.74	-18.31	3 458	4 050
23	2 853	0.030 443	0.000 623	0.001 175	0.000 018	0.280 741	0.000 026	-71.81	-9.92	3 493	3 871
24	2 681	0.028 659	0.000 449	0.001 020	0.000 016	0.280 739	0.000 021	-71.88	-13.55	3 482	3 960
25	2 888	0.039 880	0.001 105	0.001 517	0.000 043	0.280 773	0.000 019	-70.69	-8.68	3 481	3 823
26	2 752	0.054 545	0.000 428	0.001 918	0.000 014	0.280 787	0.000 018	-70.21	-11.96	3 500	3 918
27	3 027	0.025 109	0.000 463	0.000 975	0.000 017	0.280 785	0.000 028	-70.28	-4.04	3 417	3 651
28	3 137	0.040 865	0.000 244	0.001 593	0.000 007	0.280 819	0.000 015	-69.06	-1.65	3 425	3 591
29	3 062	0.028 489	0.002 067	0.001 114	0.000 083	0.280 801	0.000 026	-69.69	-2.97	3 407	3 612
30	2 985	0.024 111	0.000 593	0.000 954	0.000 023	0.280 747	0.000 023	-71.61	-6.30	3 466	3 754
32	2 827	0.043 824	0.000 382	0.001 538	0.000 013	0.280 781	0.000 020	-70.42	-9.80	3 473	3 845
34	2 625	0.032 961	0.000 214	0.001 203	0.000 006	0.280 823	0.000 015	-68.94	-12.18	3 386	3 835
35	2 463	0.030 692	0.000 631	0.001 098	0.000 023	0.280 789	0.000 015	-70.11	-16.78	3 421	3 991
36	2 851	0.031 802	0.000 235	0.001 122	0.000 009	0.280 807	0.000 016	-69.49	-7.51	3 400	3 725
37	3 003	0.027 663	0.000 951	0.000 975	0.000 028	0.280 809	0.000 015	-69.41	-3.71	3 384	3 612
38	2 596	0.027 159	0.000 244	0.000 989	0.000 010	0.280 809	0.000 015	-69.40	-12.90	3 385	3 857
39	2 849	0.048 253	0.000 602	0.001 824	0.000 023	0.280 803	0.000 031	-69.65	-9.10	3 469	3 819
40	2 815	0.034 981	0.000 531	0.001 304	0.000 017	0.280 796	0.000 025	-69.87	-9.05	3 431	3 791
41	2 555	0.030 829	0.000 969	0.001 138	0.000 034	0.280 732	0.000 025	-72.13	-16.84	3 502	4 063
42	2 736	0.032 752	0.000 401	0.001 270	0.000 016	0.280 826	0.000 021	-68.81	-9.69	3 387	3 769
43	2 978	0.032 839	0.000 852	0.001 267	0.000 029	0.280 766	0.000 035	-70.96	-6.44	3 469	3 757
44	3 098	0.023 941	0.000 133	0.000 940	0.000 005	0.280 712	0.000 038	-72.86	-4.97	3 512	3 760
45	3 091	0.030 466	0.000 189	0.001 091	0.000 010	0.280 801	0.000 015	-69.71	-2.28	3 406	3 593
46	2 640	0.043 307	0.000 246	0.001 622	0.000 007	0.280 777	0.000 023	-70.56	-14.23	3 486	3 970
47	2 706	0.027 233	0.000 241	0.000 969	0.000 006	0.280 830	0.000 015	-68.68	-9.67	3 356	3 745
48	2 553	0.037 456	0.000 711	0.001 381	0.000 022	0.280 792	0.000 018	-70.01	-15.16	3 443	3 961
49	2 967	0.038 394	0.000 835	0.001 423	0.000 030	0.280 772	0.000 024	-70.75	-6.79	3 475	3 770
50	2 664	0.034 726	0.000 604	0.001 292	0.000 021	0.280 778	0.000 022	-70.51	-13.04	3 454	3 917
51	2 530	0.034 357	0.000 344	0.001 222	0.000 011	0.280 799	0.000 015	-69.78	-15.17	3 420	3 944

源于区域古太古代基底(灰色片麻岩等)循环再造,也可能有更古老的冥古宙残片加入(Paquette et al., 2015; 沈莽庭等, 2020)。最大的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-0.53)对应 3 377 Ma(锆石颗粒年龄 3 137 Ma; 表 3)一阶模式年龄, 参考区域 Serra do Eixo 二长花岗岩和 Santa Isabel 杂岩岩浆源区特征(Santos Pinto et al., 2012; Medeiros et al., 2017)认为, Jussiape 二长花岗岩源区岩浆可能未经历或经历了极低程度的新生地壳熔融混染。

5.3 区域构造-岩浆事件及演化

Gaviao 地块陆核主要形成于古太古代, 在研究区

内以 Sete Voltas、Boa Vista、Bernada 和 Aracatu 等 TTG 单元为代表(图 2), 其岩石年龄为 3.4~3.2 Ga(表 1), 源自拉斑玄武岩的部分熔融, 残留相为含石榴子石的角闪岩或榴辉岩(Bastos Leal et al., 1998)。

Gaviao 地块在中太古代继续增生, 岩浆活动以新生(镁铁质)地壳熔融混染和古太古代地壳的循环再造为主(图 8), 研究区内主要岩石单元为 Lagoa do Morro、Serra do Eixo 和 Lagoa da Macambira 等(表 1, 图 2)。Medeiros et al.(2017)认为, Gaviao 地块南部中太古代新生地壳熔融混染作用主要发生在地块西侧边缘, 以

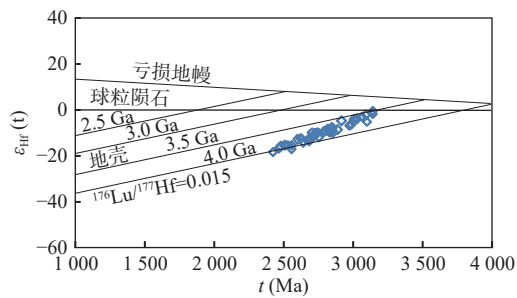


图5 Jussiape 花岗岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) - t$ 图解(底图据王欣等, 2025)
Fig. 5 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) - t$ Diagram of Jussiape granite

Santa Isabel 杂岩为典型代表(图 1)。因此, Arcanjo et al., (2005)首次提出 Santa Isabel 杂岩侵位于一个中太古代自西向东俯冲的岩浆弧中。Medeiros et al.(2017)

的研究肯定了这条岩浆弧的存在(3.2~2.9 Ga), 并认为 Santa Isabel 杂岩(结晶年龄为 3 091~3 136 Ma), Porteirinha TTG 杂岩中变质锆石的年龄(3 146 Ma), Santa Isabel 杂岩东侧古太古代岩石单元在中太古代的局部变质重结晶(Sete Voltas 和 Lagoa do Morro 正片麻岩)等显示了该时期存在一个短暂的向东的俯冲、碰撞造山和变质作用(Arcanjo et al., 2005; Medeiros et al., 2017), 一条存在于 Gaviao 地块南部东西两侧的构造活动带也被提出, 该构造活动带在西侧呈近 SN 向穿过 Santa Isabel 杂岩, 在东侧则呈 SSE(NNW)向沿 Jussiape 杂岩东边缘展布(Cruz et al., 2016; Medeiros et al., 2017; 图 1), 在东侧区域, 该构造带被命名为 Barra

表 4 Jussiape 二长花岗岩主量(%）、微量和稀土元素(10⁻⁶)分析结果

Tab. 4 Major trace (%) and rare earth elements (10⁻⁶) contents of Jussiape monzogranite

类目	4200-YQ1	4200-YQ2	4200-YQ3	类目	4200-YQ1	4200-YQ2	4200-YQ3
SiO ₂	72.23	72.5	72.39	BaO	0.03	0.04	0.04
TiO ₂	0.25	0.24	0.24	SO ₃	0.01	0.01	<0.01
Al ₂ O ₃	15.02	14.68	15.09	SrO	0.04	0.05	0.06
Fe ₂ O ₃	2.03	1.91	2.06	Cr ₂ O ₃	<0.01	<0.01	0.01
MnO	0.05	0.07	0.04	灼失	0.89	0.77	0.7
MgO	0.62	0.52	0.73	总量	100.03	99.38	100.1
CaO	1.64	1.68	1.53	TFeO	1.83	1.72	1.85
Na ₂ O	5.66	5.29	5.35	TFeO+MgO	2.45	2.24	2.58
K ₂ O	1.47	1.54	1.78	TFeO/MgO	2.95	3.31	2.53
P ₂ O ₅	0.09	0.08	0.08	K ₂ O/Na ₂ O	0.26	0.29	0.33
K	1.16	1.22	1.41	Ni	3	2.6	2.7
Ti	0.152	0.145	0.148	Pb	12.2	12.5	12.5
P	390	380	370	Rb	119	119	89.4
Ba	336	403	360	Re	<0.002	<0.002	<0.002
Be	5.04	5.87	2.06	Sc	2.8	2.8	2.6
Bi	0.04	0.05	0.04	Se	<1	<1	<1
Cd	<0.02	0.03	0.02	Sr	397	484	523
Co	2.8	3.7	2.9	Ta	0.73	0.61	0.4
Cr	19	11	18	Te	<0.05	<0.05	<0.05
Cs	2.91	2.88	3.38	Th	10.5	8.46	9.52
Ga	21.9	21.6	21.3	Tl	0.82	0.8	0.7
Ge	0.28	0.37	0.24	U	14.05	54.4	2.22
Hf	5.4	5.2	5.4	V	19	14	14
In	0.022	0.018	0.016	Y	59.6	60.9	9.4
Nb	8.4	5.9	5.9	Zr	218	201	209

续表 4

类 目	4200-YQ1	4200-YQ2	4200-YQ3	类 目	4200-YQ1	4200-YQ2	4200-YQ3
La	128	197	45.5	Er	4.24	4.94	0.84
Ce	101	135	94	Tm	0.51	0.6	0.12
Pr	16.7	29.1	8.52	Yb	2.82	3.09	0.77
Nd	61.1	103	29.4	Lu	0.37	0.41	0.12
Sm	8.5	13.75	3.45	La/Yb	45.39	63.75	59.09
Eu	1.83	2.82	0.78	ΣREE	346.89	518.30	187.70
Gd	10.45	13.75	2.18	LREE	317.13	480.67	181.65
Tb	1.36	1.87	0.27	HREE	29.76	37.63	6.05
Dy	8.38	10.95	1.45	LREE/HREE	10.66	12.77	30.02
Ho	1.63	2.02	0.3				

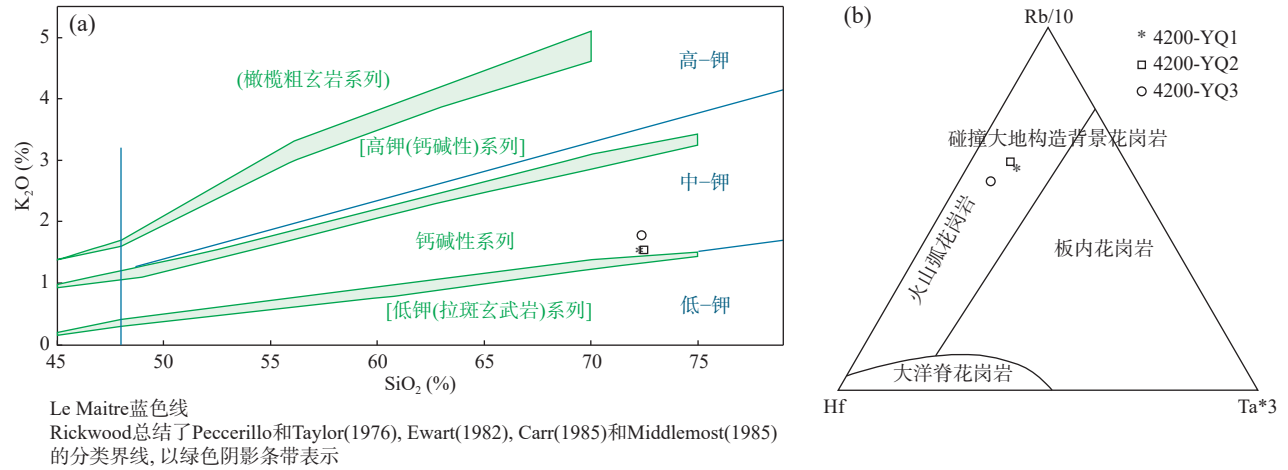


图6 Jussiape 二长花岗岩 K_2O-SiO_2 (a; 据 Coleman et al., 1975)和 $Hf-Rb-Ta$ (b; 据 Harris et al., 1986)图解

Fig. 6 (a) Diagram in terms of K_2O-SiO_2 and (b) $Hf-Rb-Ta$ of Jussiape monzogranite

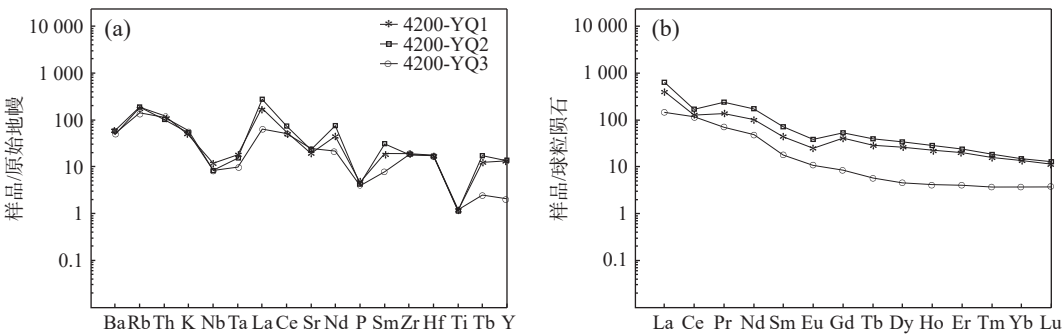


图7 Jussiape 二长花岗岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(a; 标准化数值据 McDonough, 1989)和稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(b; 标准化数值据 Boynton, 1984)

Fig. 7 (a) Primitive mantle-normalized trace element patterns and (b) chondrite-normalized REE patterns of Jussiape monzogranite

do Mendes-Joao Correa 线状构造 (LBJ) (Campos et al., 2021; 图 2)。Jussiape 二长花岗岩 (3 108 Ma) 时代与 Santa Isabel 杂岩一致, $Hf-Rb-Ta$ 图解显示其为碰撞大地构造背景下花岗岩, 指示了 Gaviao 地块南部东侧区域对该东向俯冲、碰撞造山活动的直接响应, 表明

Barra do Mendes-Joao Correa 线状构造可能自中太古代即开始活动, 为 Gaviao 地块南部西侧中太古代岩浆弧活动的次级构造, 控制或影响了区域岩浆活动。

Gaviao 地块地壳在新太古代期间逐渐趋稳, 该阶段岩浆活动主要集中在 2.8~2.5 Ga (图 8), 研究区内

表 5 Jussiape 二长花岗岩与 Serra do Eixo 杂岩地质特征对比

Tab. 5 Representative analyses and main magmatic criteria for Jussiape monzogranite and Serra do Eixo Unit

岩石特征	Jussiape二长花岗岩	Serra do Eixo二长花岗岩	Serra do Eixo碱性花岗岩
锆石 U-Pb 年龄 (Ma)	3 108	3 158	2 524~2 656
Sm-Nd 模式年龄 (Ga)	—	3.29	3.28
$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	—	0.2	−3
Lu-Hf 模式年龄 (Ma)	3 351~3 512(一阶), 3 523~4 063(二阶)	—	—
$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	−18.31~−0.53	—	—
SiO ₂	72.37	72.1	74
TiO ₂	0.24	0.22	0.39
Al ₂ O ₃	14.93	15.6	11.9
Fe ₂ O ₃	2	2	4.7
MnO	0.05	0.03	0.05
MgO	0.62	0.5	0.3
CaO	1.62	2.2	1.1
Na ₂ O	5.43	5.2	2.4
K ₂ O	1.6	2.1	5.1
P ₂ O ₅	0.08	0.06	0.07
灼失	0.78	0.7	0.57
总量	99.9	101	100
K ₂ O/Na ₂ O	0.3	0.4	2.12
La	123.5	70	115
Ce	110	136	255
Pr	18.1	14	—
Nd	64.5	19	100
Sm	8.6	6.2	18
Eu	1.8	1.5	2.3
Gd	8.8	4.7	16
Tb	1.17	0.5	—
Dy	6.9	2.2	18
Ho	1.3	0.4	3.5
Er	3.3	0.9	9.3
Tm	0.4	0.1	—
Yb	2.2	0.8	7.4
Lu	0.3	0.1	0.9
∑REE	350.87	256.4	545.4
LREE	326.5	246.7	490.3
HREE	24.37	9.7	55.1
LREE/HREE	13.4	25.4	8.9

注：主量元素含量为%，稀土元素含量为10^{−6}；Jussiape 二长花岗岩数据取表4中相关数据平均值，Serra do Eixo 杂岩数据引自 Santos Pinto et al.(2012)；— 表示无数据。

分布以 Caraguatai 正长岩和 Serra do Eixo 碱性花岗岩为代表的非造山岩浆活动单元(Cruz et al., 2012; Santos Pinto et al., 2012; 表 1, 图 2)。

古元古代中期, 在圣弗朗西斯科克拉通(构造演化时间为 2.17~1.90 Ga)与刚果克拉通(构造演化时间为 2.15~2.04 Ga)碰撞拼贴的构造背景下, Gaviao 地块与其东侧的 Jequie 地块在 2.09 Ga 左右碰撞拼贴, 导致了区域发生地壳增厚、强烈的变形变质、广泛的壳源岩浆活动及混合岩化等一系列岩浆构造事件

(Barbosa et al., 2004)。2 380~2 120 Ma, Jequie 地块即相对 Gaviao 地块开始了西向汇聚运动, 导致 Gaviao 地块南部东边缘发生西向洋壳俯冲; 西巴伊亚岩浆弧在地块南部东侧形成并开始活动, Rio do Paulo 花岗岩(2 324 Ma)即为该岩浆弧早期活动产物(Cruz et al., 2016; 表 1, 图 8)。随着汇聚、碰撞的演化, 该岩浆弧控制 Gaviao 地块南部形成了众多 2.1~1.9 Ga 花岗岩单元(表 1, 图 2)。

Barra do Mendes-Joao Correa 线状构造(LBJ)在西

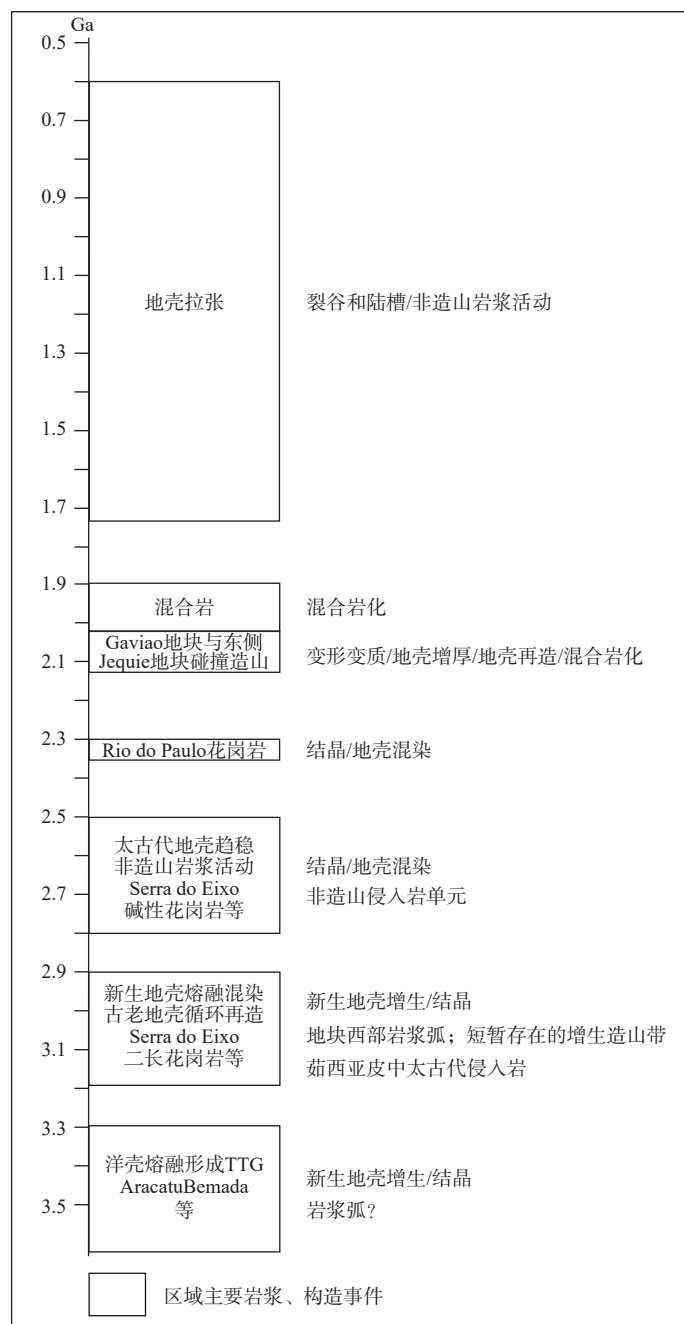


图8 Gaviao 地块岩浆构造时序图(据 Medeiros et al., 2017 修改)

Fig. 8 Evolution model of the Gaviao Block

巴伊亚岩浆弧演化期间继续活动,控制了 Jussiape I 花岗岩和 Jussiape II 正长花岗岩的侵位和展布 (Santos Pinto et al., 1998, 2012; Barbosa et al., 2002, 2004, 2013; Cruz et al., 2016; Silva et al., 2016)。Jussiape I 花岗岩 (2 122 Ma) 和其 NNW 的 Ibitiara 岩体 (2 103 Ma) 均属碰撞前壳源花岗岩单元, 二者侵入时代相近, 展布方向与 Barra do Mendes-Joao Correa 线状构造一致 (Cruz et al., 2016; 沈莽庭等, 2020), 可能均受 Barra do Mendes-Joao Correa 线状构造的控制或影响。

Barra do Mendes-Joao Correa 线状构造自中太古代开始活动, 到古元古代仍为区内重要的构造-岩浆活动带, 自中太古代到古元古代, 该线状构造经历了长期, 多期次的构造、岩浆活动和深部物质循环、混染, 为成矿物质聚集提供了有利条件。Gaviao 地块内目前发现的第一个 IOCG 型矿床 (铁氧化物铜-金矿床) Lavra Velha 小型矿床即位于 Ibitiara 花岗岩体内, 其成矿时代约为 2.1 Ga, 与区域上古元古代的金成矿期一致 (徐鸣等, 2017; Campos et al., 2021), 该矿床也可能是目前圣弗朗西斯科克拉通内第一个确定的 IOCG 型矿床, 具有非常重要的勘查指示意义。IOCG 型矿床通常与区域大规模的交代作用相关, 区域上很可能还存在其他尚未发现的同类型矿床, 表明圣弗朗西斯科克拉通在古元古代也具有 IOCG 型矿床的成矿潜力 (Campos et al., 2021)。因此, 以 Jussiape 杂岩为代表的这条 NNW 向构造带构成了 Gaviao 地块内重要的构造-岩浆-成矿带, 首次显示出 IOCG 型矿床成矿潜力。继续开展 Ibitiara 花岗岩成矿研究及调查, 关注 Jussiape I 花岗岩 IOCG 型矿床成矿潜力并深入开展研究和调查工作, 可能是 Gaviao 地块内乃至圣弗朗西斯科克拉通内该类型矿床实现勘查突破的有效途径。

6 结论

(1) Jussiape 杂岩包含中太古代侵位的 Jussiape 二长花岗岩, 其锆石 LA-ICP MS U-Pb 年龄为 $(3\ 108 \pm 22)$ Ma, 源于古老地壳的循环再造, 受 Barra do Mendes-Joao Correa 线状构造控制, 是对中太古代 Gaviao 地块南部西侧岩浆弧活动的响应, 与区域中太古代短暂存在的自西向东的俯冲、碰撞造山大地构造背景一致。

(2) Barra do Mendes-Joao Correa 线状构造在古元古代持续活动, 构成了区内重要的构造-岩浆-成矿带,

首次显示出 IOCG 型矿床成矿潜力, 建议关注 Jussiape I 花岗岩 IOCG 型矿床成矿潜力并深入开展研究和调查工作。

利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献 (References):

- 陈岳龙, 罗照华, 赵俊香, 等. 从锆石 SHRIMP 年龄及岩石地球化学特征论四川冕宁康定杂岩的成因 [J]. 中国科学 (D 辑), 2004, 34(8): 687-697.
- CHEN Yuelong, LUO Zhaohua, ZHAO Junxiang, et al. Genesis of the Mianning Kangding Complex in sichuan province from zircon SHRIMP age and petrogeochemical characteristic [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2004, 34(8): 687-697.
- 何俊, 齐泽秋, 李为用, 等. 单种矿物单颗粒 Rb-Sr 同位素等时线定年的成矿年代学应用前景 [J]. 华东地质, 2024, 45(1): 16-25.
- HE Jun, QI Zeqiu, LI Weiyong, et al. Application prospect of the single-grain mineral Rb-Sr isotopic isochron dating in metallogenic geochronology [J]. East China Geology, 2024, 45(1): 16-25.
- 胡运行, 顾枫华, 章永梅, 等. 新疆别珍套山西段中酸性侵入岩岩石成因: 来自岩石地球化学、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素的制约 [J]. 西北地质, 2025, 58(5): 99-122.
- HU Yunhang, GU Fenghua, ZHANG Yongmei, et al. Petrogenesis of Intermediate-acidic Intrusive Rocks in the Western Part of Biezhentao, Xinjiang: Constraints from Petrogeochemistry, Zircon U-Pb Dating and Hf Isotope [J]. Northwestern Geology, 2025, 58(5): 99-122.
- 彭璇, 庄玉军, 辜平阳, 等. 柴北缘小赛什腾山片麻状花岗岩的成因: 来自地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素约束 [J]. 西北地质, 2022, 55(4): 221-239.
- PENG Xuan, ZHUANG Yujun, GU Pingyang, et al. Petrogenesis of the Gneissic Granite in Xiaosaishiteng mountain, Northern Qaidam: Constraint from Geochemistry, Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopes [J]. Northwestern Geology, 2022, 55(4): 221-239.

- 沈莽庭, 徐鸣, 高天山, 等. 巴西圣弗朗西斯科克拉通 Ibitiara 岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 世界地质, 2020, 39(1): 1-15.
- SHEN Mangting, XU Ming, GAO Tianshan, et al. Zircon U-Pb geochronology, geochemical characteristics and geological implication of Ibitiara pluton from San Francisco Craton in Brazil[J]. Global Geology, 2020, 39(1): 1-15.
- 王欣, 王雪, 陈建, 等. 华北克拉通大陆地壳的生长与演化: 来自锆石 U-Pb 年代学、微量元素以及 Hf-O 同位素证据[J]. 地质学报, 2025, 99(7): 2463-2478.
- WANG Xin, WANG Xue, CHEN Jian, et al. Growth and evolution of the North China craton: Evidence from zircon U-Pb geochronology, trace elements and Hf-O isotopes[J]. Acta Geologica Sinica, 2025, 99(7): 2463-2478.
- 王一丁. 锆石成因矿物学与 U-Pb 同位素定年应用[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(3): 238-244.
- WANG Yiding. The Review of Zircon Genesis Mineralogy and U-Pb Isotope Dating[J]. Advances in Geosciences, 2022, 12(3): 238-244.
- 王志强, 周美娟, 黎训飞, 等. 高硅花岗岩流体出溶作用的识别和意义[J]. 华东地质, 2024, 45(1): 26-48.
- WANG Zhiqiang, ZHOU Meijuan, LI Xunfei, et al. Identification and significance of fluid exsolution in high silica granite[J]. East China Geology, 2024, 45(1): 26-48.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 185-220.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, ZHENG Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic systematics and their application in petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(2): 185-220.
- 谢应波, 褚刚, 罗华, 等. 鄂东南铁铜金钨钼多金属矿集区基底属性: 来自继承锆石年龄和 Hf 同位素的约束[J]. 西北地质, 2024, 57(5): 283-297.
- XIE Yingbo, CHU Gang, LUO Hua, et al. Basemental Attribution of the Fe-Cu-Au-W-Mo Polymetallic Ore Cluster in the Southeastern Hubei: Constraint from the Ages and Hf Isotopes of the Inherited Zircons[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(5): 283-297.
- 徐鸣, 姚仲友, 沈莽庭, 等. 巴西巴伊亚圣弗朗西斯科克拉通北部地质构造背景、矿床类型及成矿作用[J]. 地质通报, 2017, 36(12): 2164-2178.
- XU Ming, YAO Zhongyou, SHEN Mangting, et al. Geological-structural background, deposit types and mineralization of Sao Francisco Craton in Bahia, Brazil[J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(12): 2164-2178.
- 郑永飞, 陈仁旭, 张少兵, 等. 大别山超高压榴辉岩和花岗片麻岩中锆石 Lu-Hf 同位素研究[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 317-330.
- ZHENG Yongfei, CHEN Renxu, ZHANG Shaobing, et al. Zircon Lu-Hf isotope study of ultrahigh-pressure eclogite and granitic gneiss in the Dabie orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(2): 317-330.
- Almeida F F M. Origem e evolucao da Plataforma Brasileira[D]. Rio de Janeiro, Boletim, 1967.
- Almeida F F M. O craton de Sao Francisco[J]. Revista Brasileira de Geociencias, 1977, 7: 349-364.
- Anderson T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2): 59-79.
- Arcanjo J B, Marques Martins A A, Loureiro H S C, et al. Projeto-Vale do Paramirim, Bahia: geologia e recursos minerais[R]. Salvador, CBPM. Serie Arq, 2005, Abertos 22, 82.
- Barbosa J S F, Sabate P. Geological feature and the paleoproterozoic four-archean crustal segments of the Sao Francisco Craton, Bahia, Brazil. A synthesis[J]. Anais Da Academia Brasileira De Ciencias, 2002, 2: 343-359.
- Barbosa J S F, Sabate P. Archean and paleoproterozoic crust of the Sao Francisco Craton, Bahia, Brazil: geodynamic features[J]. Precambrian Research, 2004, 133: 1-27.
- Barbosa N S, Teixeira W, Bastos Leal L R, et al. Evolucao crustal do setor Ocidental do Bloco Arqueano Gaviao, Craton do Sao Francisco, com base em evidencias U-Pb, Sm-Nd e Rb-Sr[J]. Rev. do Inst. Geociencias e USP, 2013, 4: 63-88.
- Bastos Leal L R, Teixeira W, Cunha J C, et al. Archean tonalitic-trondhjemitic and granitic plutonism in the Gaviao block, Sao Francisco Craton, Bahia, Brazil: geochemical and geochronology characteristics[J]. Revista Brasileira de Geociencias, 1998, 2: 209-220.
- Blichert Toft J, Albarede F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 148: 243-258.
- Boynnton W V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[A]. Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry[C]. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-114.
- Campos L D, Oliveira C G, Ganade C E, et al. Metallogenesis of the Rhyacian Lavra Velha gold-rich IOCG deposit in the Sao Francisco Craton, Brazil[J]. Ore Geology Reviews, 2021, 104: 148.

- Coleman R G, Peterman Z E. Oceanic plagiogranite[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80: 1099–1108.
- Cruz S C P, Peucat J J, Teixeira L, et al. The Caraguataí syenitic suite, a ca. 2.7 Ga-old alkaline magmatism (petrology, geochemistry and U–Pb zircon ages). Southern Gavião block (São Francisco Craton), Brazil[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2012, 37: 1–18.
- Cruz S C P, Barbosa J S F, Pinto M S, et al. The Siderian–Orosirian magmatism in the Gavião Paleoplate, Brazil: U–Pb geochronology, geochemistry and tectonic implications[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2016, 69: 43–79.
- Delgado I M, Souza J D, Silva L C. Geotectônica do Escudo Atlântico, geotectonics of the Atlantic shield[A]. Bizzi L A, Schobbenhaus C, Vidotti R M J. *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*[C]. CPRM Brasília, 2003, 5: 227–334.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of orogenic mantle: LA–MC–ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(1): 133–147.
- Griffin W L, Wang Xiang, Jackson S E, et al. Zircon chemistry and magmatism, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 2002, 61: 237–269.
- Guimaraes J T, Teixeira L R, Silva M G, et al. Datações U/Pb em rochas magmáticas intrusivas no Complexo Paramirim e no Rife Espinhaço: uma contribuição ao estudo da evolução geocronológica da Chapada Diamantina[A]. SBG/BA–SE, Simposio do Craton do São Francisco, Salvador, Anais de Resumos Expandidos[C]. 2005: 159–161.
- Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. Geochemical characteristics of collision–zone magmatism[A]. Coward M P, Ries A C. *Collision Tectonics*[C]. Geological Society Special Publications, London, 1986, 19: 67–81.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling induced melt–peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U–Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51: 537–571.
- Ludwig K R. User's Manual for Isoplot/Ex, Version 3.70. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 4: 1–76.
- Marinho M M, Sabate P, Barbosa J S F. The Contendas–Mirante volcanic–sedimentary belt[A]. Pedreira A J. Petrologic and geochronologic evolution of the oldest segments of the São Francisco Craton, Brazil[C]. IGCP Project 280, 1992: 29–75.
- McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle compositions and processes [A]. Saunders A D. *Magmatism in the Oceanic Basins*[C]. London: Special Publication, 1989.
- Medeiros E L M, Cruz S C P, Barbosa J S F, et al. The Santalzalabel Complex, Gavião Block, Brazil: Components, geochronology, regional correlations and tectonic implications[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2017, 80: 66–94.
- Noce C M. Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais[D]. São Paulo, Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 1995, 1–128.
- Paquette J L, Barbosa J S F, Rohais S, et al. The geological roots of South America: 4.1 Ga and 3.7 Ga zircon crystals discovered in N. E. Brazil and N. W. Argentina[J]. *Precambrian Research*, 2015, 271: 49–55.
- Santos Pinto M, Peucat J J, Martin H, et al. Recycling of the Archaean continental crust: the case study of the Gavião Block, Bahia, Brazil[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 1998, 11: 487–498.
- Santos Pinto M, Peucat J J, Martin H, et al. Crustal evolution between 2.0 and 3.5 Ga in the southern Gavião block (Uburanas–Bramado–Aracatu region), São Francisco Craton, Brazil: a 3.5–3.8 Ga proto-crust in the Gavião block[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2012, 40: 129–142.
- Silva L C, Pedrosa Soares A C, Armstrong R, et al. Disclosing the Paleoproterozoic to Ediacaran history of the São Francisco craton basement: the Porteirinha domain (northern Aracuaí orogen, Brazil)[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2016, 68: 50–67.
- Soderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, et al. The decay constant of ¹⁷⁶Lu determined from Lu–Hf and U–Pb isotope systematics of terrestrial Precambrian high-temperature mafic intrusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 219: 311–324.
- Teixeira W, Carneiro M A, Noce C M, et al. Pb, Sr and Nd isotopic constraints on the Archaean evolution of gneissic granitoid complexes in the southern São Francisco Craton, Brazil[J]. *Precambrian Research*, 1996, 78: 151–164.