

西藏加查堆花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学及地质意义

永忠拉达¹, 卢君勇², 索朗顿旦¹, 罗兴海², 祝建华²

(1. 西藏自治区地质矿产勘查开发局第二地质大队, 西藏 拉萨 850000; 2. 四川省地质矿产勘查开发局二零七地质队, 四川 乐山 614000)

摘要: 这是一篇地球科学领域的论文。冈底斯带岩浆岩是青藏高原基础地质研究中的热门问题。现有的研究主要集中在中新生代, 本文对早古生代表岩体加查堆似斑状黑云母二长花岗闪长岩利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年方法, 结合岩石地球化学特征及各类图解法对加查堆花岗岩物源及区域构造属性进行分析, 经研究表明岩石具有富铝 (SiO_2 平均含量 68.89%)、高碱 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 平均含量 6.26%)、富钾 ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=1.03$)、低 TiO_2 (平均为 0.50%) 和准铝质 (铝饱和指数 $\text{A/CNK}=0.933 \sim 1.033$, 平均 0.991) 的高钾钙碱性岩系特点。稀土元素表现 Eu 处呈负异常明显, 为 Eu 亏损型, Ce 具弱负异常; 微量元素显示大离子亲石元素 Rb、Th、Nd、La、K 富集; 高场强元素 Nb、Ba、U、Ta、Ce、Sm、Ti 亏损特征; 反映了岩浆来源壳幔混合型, 并有俯冲洋壳熔融存在。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年龄为 $345.3 \pm 1.8 \text{ Ma}$, 其形成时代为早石炭世。投点均落入 I 型花岗岩区, 图解显示其形成于大陆岛弧环境, 岩石经历了从板块碰撞前→同碰撞造山过程, 显示了岩浆演化过程较长; 火山岩组合及其地球化学特征标志着岛弧产生 (初始岛弧)→发展 (早期岛弧)→成熟 (成熟岛弧) 的演变过程。

关键词: 地球科学; LA-ICPMS U-Pb 定年; 锆石微量元素; 加查; 早石炭世; 花岗闪长岩

doi:[10.3969/j.issn.1000-6532.2024.01.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6532.2024.01.012)

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 01-0099-10

引用格式: 永忠拉达, 卢君勇, 索朗顿旦, 等. 西藏加查堆花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学及地质意义[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(1): 99-108.

YONGZHONGLADA , LU Junyong, SUOLANGDUNDAN , et al. Geochronology and geochemistry of the Jiaчadui ganodiorite in Xizang and its geological implications[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(1): 99-108.

冈底斯带南缘位于班公湖-怒江结合带与雅鲁藏布江结合带之间, 该带因记录了青藏高原自古特提斯至新特提斯以来的构造演化和陆内汇聚作用等重要地质信息而备受世界地学界瞩目, 被视为研究冈瓦纳大陆北缘特提斯洋形成演化和青藏高原陆内汇聚作用的关键地区。研究区发育巨型岩基, 记录了新特提斯洋板片俯冲和印亚碰撞下多次岩浆事件^[1-4]。尽管前人从多学科对冈底斯带岩浆作用, 特别是拉萨地块进行了长期深入研究, 并取得丰硕成果, 从研究时期主要集中于早侏罗-始新世花岗岩体^[5-8], 对早古生代花岗岩研究

较为薄弱。笔者通过西藏加查地区 1:5 万地质矿产调查, 发现了早古生代石炭世花岗岩。本文对加查地区新发现的加查堆花岗岩开展了锆石 U-Pb 年龄和地球化学研究, 以期讨论加查堆花岗岩的源区性质和构造背景及其区域构造演化意义。

1 地质概况

加查地区花岗岩体分布于雅鲁藏布江结合带北侧、冈底斯陆缘火山—岩浆弧南一带, 区域上属于冈底斯花岗岩带南亚带^[9]。地层以三叠系和侏罗系地层为主, 次为第四系地层, 主要包括中元

收稿日期: 2022-09-29

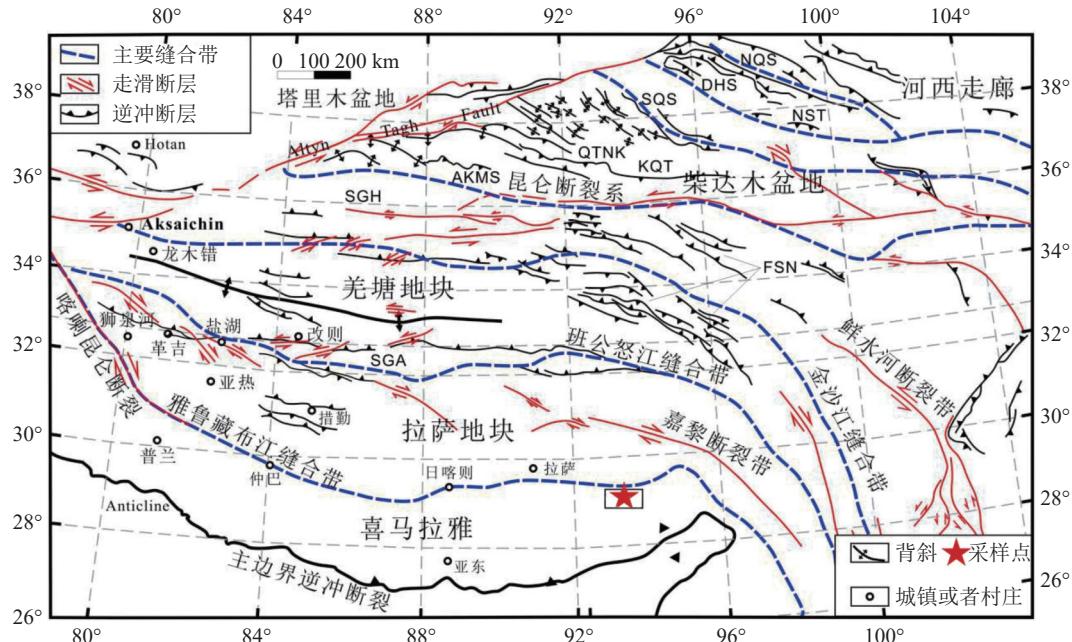
基金项目: 重要矿产资源调查计划项目: 西藏加查地区矿产远景调查 (12120113035000)

作者简介: 永忠拉达 (1986-), 男, 学士, 工程师, 主要从事地质调查及矿产勘查工作。

通信作者: 卢君勇 (1987-), 男, 学士, 工程师, 主要从事地质调查及矿产勘查工作。

古代冈底斯岩群 ($Pt_{1-2}G$)、晚三叠系姐德秀岩组 (T_3j)，新近系—古近系大竹卡组 (E_3N_1d) 及第四系地层。其中冈底斯岩群受后期花岗岩吞噬及构造叠加破坏，地层发育欠完整。新近系—古近系

大竹卡组呈近东西向分布，第四系松散堆积物主要分布于雅鲁藏布江及其两岸较大支流河谷地带；岩浆侵入与雅鲁藏布江扩张向北俯冲、消减以及印度与欧亚板块碰撞有关（图 1）。



AKMS: 阿尼玛卿-昆仑-木孜塔格缝合带; DHS: 党河南山缝合带; FSN: 风火山-囊谦褶皱逆冲带; KQT: 昆仑-柴达木地体; QTNC: 邵门-阿尔金-北昆仑逆冲系; NCB: 华北板块; NCS: 北祁连缝合带; NST: 南山逆冲带; SGA: 狮泉河-改则-安多逆冲系; SGH: 松潘-甘孜-可可西里地体; SQS: 南祁连缝合带

图 1 青藏高原大地构造 (据 Yin and Harrison (2000)^[10] 和 Ma et al. (2014)^[11] 修改)
Fig.1 Qinghai-Xizang plateau Geotectonics (after Yin and Harrison, 2000, Ma et al. 2014)

2 样品采集和分析测试

本文样品采自加查堆布垅曲沟口花岗岩露头区，采样点坐标 $92^{\circ}39'25''E$ 、 $29^{\circ}9'52''N$ 。岩体近东西向展布，北面被塔布岭石英闪长岩体与色布垅曲角闪石岩体侵入，南面为渐新世—中新世大竹卡组砾岩不整合覆盖，呈岩株状产出（图 2）。岩石类型为似斑状黑云母二长花岗闪长岩（图 3a）：镜下观测斜长石含量约 35%，钾长石含量约 25%，石英含量约 20%；黑云母含量约 5% 左右，角闪石含量约 10%；副矿物磷灰石、榍石、锆石；次生矿物有绢云母、高岭土、黝帘石（图 3b）。

全岩主量、稀土及微量元素由国土资源部保定矿产资源监督检测中心（河北省地矿中心实验室）测试；LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析由中国地质大学（武汉）地质过程与矿产资源国家重点实验室测试。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素和微量元素分析方法和流程见 Yuan et al. (2004), 谭细娟等（2022）^[12-13]。

3 检测结果

3.1 主量元素

岩石化学成分表明（表 1）加查堆岩体 3 件样品 SiO_2 含量在 68.54%~69.45%，平均含量为 68.89%，属于酸性岩范畴。 Al_2O_3 含量在 14.01%~14.45%，平均含量为 14.16%，铝饱和指数 A/CNK 为 0.933~1.033，具准铝质特点，属于弱过铝质岩浆岩。 K_2O 含量在 2.76%~3.55%，平均含量为 3.17%，富钾 ($K_2O/Na_2O=0.83\sim1.20$ ，平均 1.03)， TiO_2 含量低（0.46%~0.53%，平均 0.50%）， MgO 含量较低（1.12%~1.43%，平均 1.31%），低钙（ $CaO=2.68\%\sim3.86\%$ ，平均 3.20%），贫铁（ $Fe_2O_3=0.80\%\sim1.85\%$ ，平均 1.16）；全碱 Na_2O+K_2O 平均含量为 6.26%；里特曼指数 (σ) 为 1.44~1.64，属钙性岩系列。该花岗岩常量元素图解均投入花岗闪长岩内，图解上主要表现为中钾-高钾钙碱性特征（图 4）。

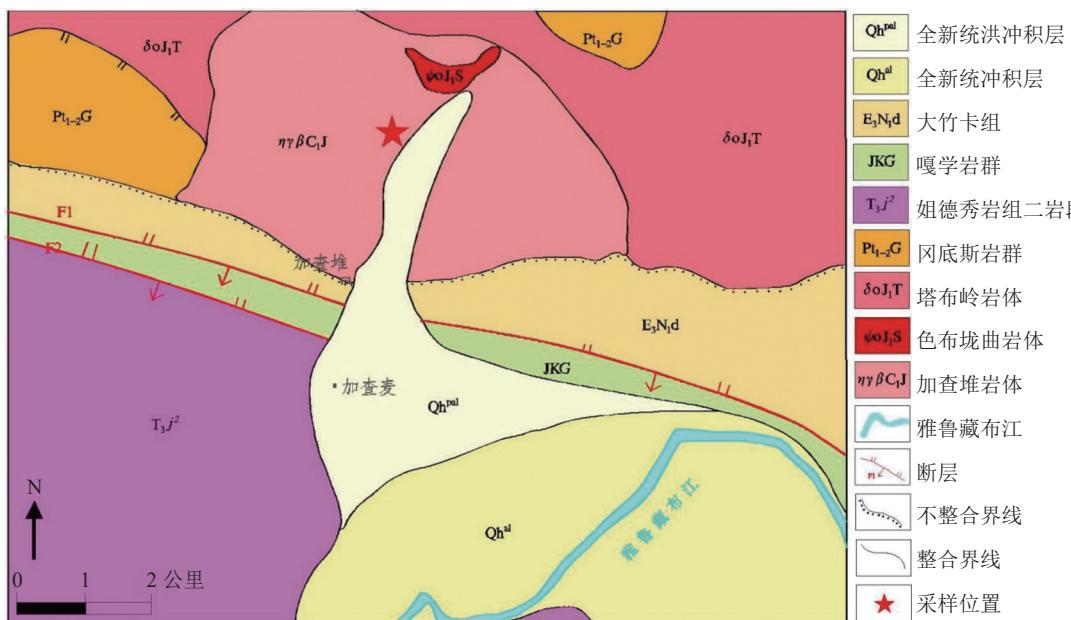


图2 研究区地质简图
Fig.2 Geological sketch of the studying area

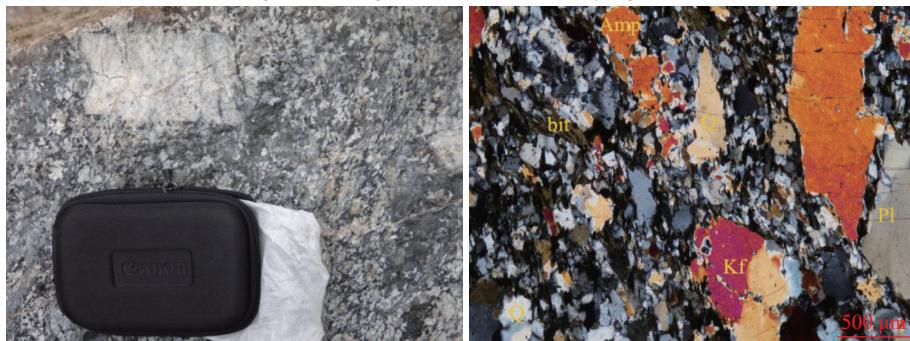


图3 加查堆岩体露头及镜下照片 (Kf-钾长石, bit-黑云母, Amp-角闪石, Q-石英, Pl-斜长石)
Fig.3 Outcrops and microscopic photographs of the Gacha mound body (Kf-potassium feldspar, bit-black mica, Amp-hornblende, Q-quartz, Pl-plagioclase feldspar)

3.2 稀土及微量元素

稀土、微量元素丰度及特征显示(表1)：加查堆岩体3件样品稀土总量 $\sum REE = (185.02-199.84) g/t$, $La_N/Yb_N = 6.55 \sim 7.91$, LREE = $(160.38 \sim 174.63) g/t$, HREE = $(22.48 \sim 25.21) g/t$, LREE/HREE = $6.51 \sim 7.56$; $\delta Eu = 0.52 \sim 0.54$; $\delta Ce = 0.90 \sim 0.91$; 利用球粒陨石标准化^[17]配分曲线图向右倾斜(图5)，以铕为界左陡右缓。轻稀土富集，分馏明显程度较高，重稀土亏损，分馏不明显程度较低，样品曲线在Eu处呈负异常明显，为Eu亏损型，Ce具弱负异常，反映岩石为低度的部分熔融或分溢作用较弱的岩浆产物。微量元素原始地幔标准化^[17]蜘蛛网图(图6)，呈低谷负异常“多峰多谷”形态，大离子亲石元素Rb、Th、Nd、La、K富集；高场强元素Nb、Ba、U、Ta、Ce、

Sm、Ti亏损，与典型岛弧型岩浆相似，显示与俯冲作用有关火成岩地球化学特点^[18]，反映源区可能存在角闪石、金红石难熔残余。

3.3 锆石U-Pb年代学特征

在研究区样品(样号P1304/6-2TW)中挑选的15颗锆石点进行了激光剥蚀等离子体质谱仪同位素分析，锆石形态较为完整，呈次圆状-次棱角状，自形程度较好，大多为无色透明，部分具浅棕色，代表性锆石阴极发光图像显示，大部分锆石具有清晰的韵律环带结构，锆石大多显示振荡环带状岩浆锆石成因特征^[20]。锆石Th/U比值为0.2158~0.3117之间，反映岩浆成因特征^[21]。锆石U-Pb同位素分析结果表可知各点 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄在342~350 Ma之间(表2)，均落在谐和线上或者附近，加权平均年龄为 $(345.3 \pm 1.8) Ma$ (MSWD=

表 1 加查堆岩体主要元素(%) 标准矿物及特征参数表及微量元素(g/t) 和稀土元素(g/t) 分析数据
Table 1 Major element compositions andtrace element and rare-earth element compositions in Jiachadui rock mass

岩体	样品号	岩性	化学成分/%																			
			SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻						
加查堆 岩体	P1304/2-1	似斑状黑云母二长花岗闪长岩	68.68 68.54 69.45	0.51 0.46 0.53	14.03 14.45 14.01	1.85 0.82 0.80	2.62 3.46 3.22	0.032 0.047 0.041	1.39 1.12 1.43	2.68 3.86 3.05	2.96 3.33 2.99	3.55 2.76 3.19	0.12 0.12 0.11	0.44 0.27 0.26	1.12 0.38 0.86	0.19 0.01 0.01	100.172 99.627 99.951					
	P1304/6-2																					
	P1304/8-1																					
CIPW标准矿物及含量/%																						
样品号	Or	Ab	An	C	Di	Hy	Q	Ap	σ	A·R	A/CNK	DI	SI	A/MF	C/MF	特征参数						
P1304/2-1	21.22	25.33	10.01	1.71	-	6.12	30.67	0.28	1.64	2.28	1.033	77.22	11.24	1.46	0.51							
P1304/6-2	16.43	28.38	16.45	-	0.43	7.63	27.68	0.28	1.45	2	0.933	72.49	9.75	1.64	0.8							
P1304/8-1	19.02	25.53	13.06	0.9	-	8.09	30.35	0.26	1.44	2.14	1.007	74.9	12.3	1.52	0.6							
微量元素含量/(g/t)																						
岩体	样品号	岩性	Rb	Sr	Zr	Nb	Th	Pb	Ga	Zn	Cu	Ni	V	Cr	Hf	Sc	Ta	Co	U	Ba		
加查堆 岩体	P1304/2-1	似斑状黑云母二长花岗闪长岩	170.6 131.8 126.2	196 269 221	178.4 174.5 168.1	14.0 16.4 13.7	15.4 15.5 16.4	18.2 25.1 25.5	16.8 17.6 17.7	72.8 76.8 68.6	15.4 9.43 6.38	4.05 3.28 3.17	69.3 71.6 59.9	18.5 15.8 16.3	9.42 12.7 10.0	11.8 11.9 10.6	1.24 1.46 1.18	9.18 9.17 8.11	1.44 2.96 3.58	508.3 444.6 517.7		
	P1304/6-2																					
	P1304/8-1																					
稀土元素含量/(g/t)																	特征参数					
样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	LRREE/HREE	δEu	δCe	(La/Yb) _N
P1304/2-1	45.6	80.6	9.09	32.3	5.98	1.06	6.02	1.13	6.45	1.46	4.37	0.70	4.45	0.63	45.2	199.84	174.63	25.21	6.93	0.53	0.91	7.35
P1304/6-2	41.8	73.3	8.46	30.2	5.65	0.97	5.69	1.00	6.14	1.44	4.35	0.73	4.58	0.71	45.1	185.02	160.38	24.64	6.51	0.52	0.90	6.55
P1304/8-1	45.1	78.2	8.88	31.3	5.48	0.98	5.41	0.95	5.57	1.29	3.88	0.66	4.09	0.63	40.3	192.42	169.94	22.48	7.56	0.54	0.90	7.91

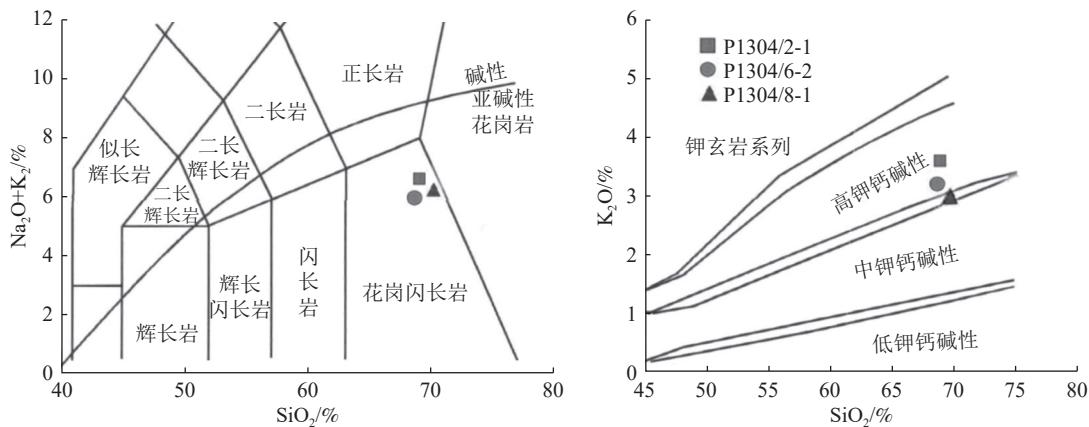
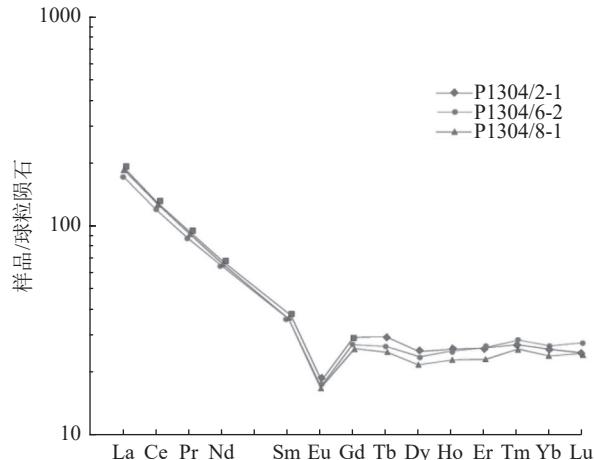


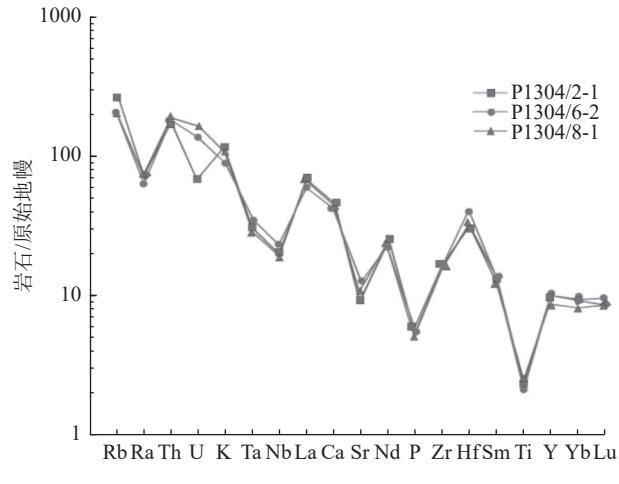
图4 加查堆花岗闪长岩 $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O+K}_2\text{O}$ (据 Irvine 等, 1971^[14]; Middlemost, 1994^[15]) 和 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ (据 Rickwood, 1989^[16])

Fig.4 $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O+K}_2\text{O}$ (after Irvine et al., 1971; Middlemost, 1994) and $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ (after Rickwood, 1989)



(球粒陨石数据值据 Boynton, 1984^[19])

图5 加查堆岩体稀土元素球粒陨石标准化图解
Fig.5 Chondrite-normalized REE-pattern diagram for Jiachadui rock mass (from Boynton, 1984)



(原始地幔数据值据 Sun 等, 1989)

图6 加查堆岩体微量元素原始地幔标准化图解
Fig.6 Primitive-mantle normalized spider diagram for Jiachadui rock mass (from Sun, et al., 1989)

表2 加查堆岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果
Table 2 LA-ICP-MS U-Pb isotopic data of zircon from Jiachadui rock mass

样品	含量(g/t)		同位素比值						年龄/Ma						
	^{232}Th	^{238}U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
JCD2-TW1	1195	5361	0.22	0.0534	0.0012	0.4062	0.0102	0.0547	0.0008	346	50	346	7	343	5
JCD2-TW2	827	3833	0.22	0.0524	0.0011	0.3981	0.0087	0.0548	0.0005	302	50	340	6	344	3
JCD2-TW3	1322	5378	0.25	0.0530	0.0012	0.4025	0.0102	0.0546	0.0007	328	56	343	7	342	4
JCD2-TW4	923	4122	0.22	0.0540	0.0012	0.4172	0.0097	0.0557	0.0005	369	52	354	7	350	3
JCD2-TW5	1322	5370	0.25	0.0538	0.0012	0.4069	0.0094	0.0546	0.0007	361	44	347	7	343	4
JCD2-TW6	1030	4371	0.24	0.0542	0.0013	0.4135	0.0098	0.0550	0.0005	389	54	351	7	345	3
JCD2-TW7	1379	5699	0.24	0.0528	0.0012	0.4019	0.0099	0.0549	0.0006	320	54	343	7	345	4
JCD2-TW8	1456	5634	0.26	0.0537	0.0013	0.4072	0.0102	0.0548	0.0006	367	56	347	7	344	4
JCD2-TW9	1162	4762	0.24	0.0531	0.0014	0.4095	0.0113	0.0555	0.0006	332	59	348	8	348	4
JCD2-TW10	1099	4196	0.26	0.0531	0.0012	0.4079	0.0095	0.0553	0.0006	332	52	347	7	347	4
JCD2-TW11	1034	3317	0.31	0.0568	0.0015	0.4341	0.0110	0.0552	0.0006	483	53	366	8	346	4
JCD2-TW12	1100	4387	0.25	0.0559	0.0013	0.4301	0.0104	0.0553	0.0006	456	52	363	7	347	3
JCD2-TW13	1347	5154	0.26	0.0535	0.0012	0.4098	0.0091	0.0551	0.0004	350	52	349	7	346	3
JCD2-TW14	1538	5990	0.26	0.0532	0.0012	0.4074	0.0094	0.0549	0.0006	345	52	347	7	345	4
JCD2-TW15	1377	5588	0.25	0.0526	0.0013	0.4030	0.0099	0.0548	0.0006	322	56	344	7	344	4

0.32), 该年龄值代表加查堆似斑状黑云母二长花

岗闪长岩结晶年龄(图 7)。

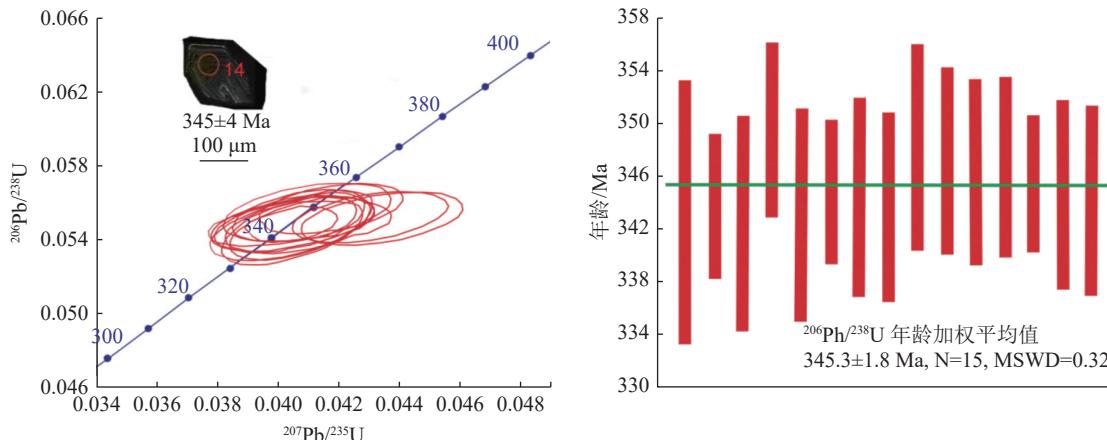


图 7 加查堆岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图
Fig.7 LA-ICP-MS U-Pb zircon concordia diagram from Jiachadui rock mass

4 讨 论

4.1 源区特征和构造背景

4.1.1 构造环境分析

加查堆花岗闪长岩具有高钾、低钙、弱过铝质钙碱性特点, 富碱和过铝质特征是富角闪石源区深熔产生的深源花岗岩的典型特征^[22], 此类岩石一般形成于碰撞事件后的张驰阶段或从挤压体制向拉张体制转变的过程中^[23]。岩石富集大离子亲石元素 Rb、Th、Nd、La、K; 高场强元素 Nb、Ba、U、Ta、Ce、Sm、Ti 亏损, 与典型岛弧型岩浆相似, 显示出与俯冲作用有关火成岩地球化学特点, 并反映了源区可能存在角闪石、金红石难熔残余。岩石的 SiO₂、MgO、Fe₂O₃ 和 TiO₂ 含量变化非常小, 说明不存在明显的分离结晶过程; K/Rb 平均为 221.7, >150, 表明岩浆分异或水热作用不明显^[24]; 稀土总量较低(平均 99.92 g/t), 接近地壳中酸性岩浆岩平均稀土含量(165.35 g/t); Th/U 值(4.58~10.69, 平均为 6.84) 和 La/Yb 值(9.13~11, 平均为 10.1) 分别与下地壳的 Th/U 值(6.0) 和 La/Yb 值最接近; K/U 值(平均为 14296) 分别接近中地壳 K/U 值; Nb/Ta(平均为 11.40) 接近于地壳平均值^[25], 说明加查堆岩体源于中下地壳。岩石具有低的 Zr 含量(168.1~178.4 g/t) 和高的 Al₂O₃(14.0%~14.40%) 含量, 这也与岛弧火山岩的特征一致^[26-27], 在各图解显示(图 8), Zr/Y-Zr 及 Rb-Y+Nb 图解中投入板内(表 3), 说明岩石形成于碰撞造山环境下; 另外在 Th/Yb-Nb/Yb 和 Rb-Yb+Ta 图解上(表 3), 样品均落入大陆岛弧

区域内, 同时在野外观测加查堆岩体中见陆源碎屑物, 说明其形成于大陆岛弧环境。

蛛网图 Nb-Ta、P 和 Ti 亏损、Zr 富集特点也指示其壳源成因。轻微向右倾斜的稀土配分模式和强烈的 Eu 负异常反映其具有地壳重熔型岩浆岩的特点。该岩体具高的 K₂O/Na₂O(平均为 1.03) 和低的 Sr/Ba 值(0.39~0.61, 平均为 0.47), 指示该岩石为中性岩浆岩在无水条件下部分熔融的产物^[32], 故推断加查堆岩体可能是中下地壳中性岩石部分熔融的产物。

岩石内普遍含黑云母和少量角闪石, 钾长石为微斜长石、条纹长石、正长石, 斜长石属钠—钙长石。岩石化学特征显示钙性钾玄武岩系列, Na₂O/K₂O 比值 0.83~1.21, 平均 0.99, A/CNK 为 0.933~1.033, A/CNK<1.1, 为准铝质型。微量元素 La_N/Yb_N=6.55~7.91, δEu 为 0.52~0.54, 平均 0.53, Eu 具负异常, 反映加查堆岩体物源为壳幔混合型, 并有俯冲洋壳熔融存在。

4.1.2 源区特征分析

火山岩的 Zr、Y、Rb、Th、Yb、Nb 等同位素地球化学特征可以反映地幔和深部地壳的信息, 揭示岩浆源区的特征及其性质。关于长英质岩浆的成因, 目前有两种较为普遍的认识: 一种是从相同的地幔岩浆结晶分异而来^[33]。另一种是由于幔源岩浆底侵作用地壳深熔形成^[34]。加查堆岩体化学成分显示钙性—钾玄岩演化特征, 铝饱和度中等(A/CNK 为 0.933~1.033, 平均 0.991), 在 Collins 等(1982)^[28]图解中三件样品投点均落入 I 型花岗岩区, 印证了以上地壳熔融的观点(图 8), 在微量元素蛛网图中大离子亲石元素

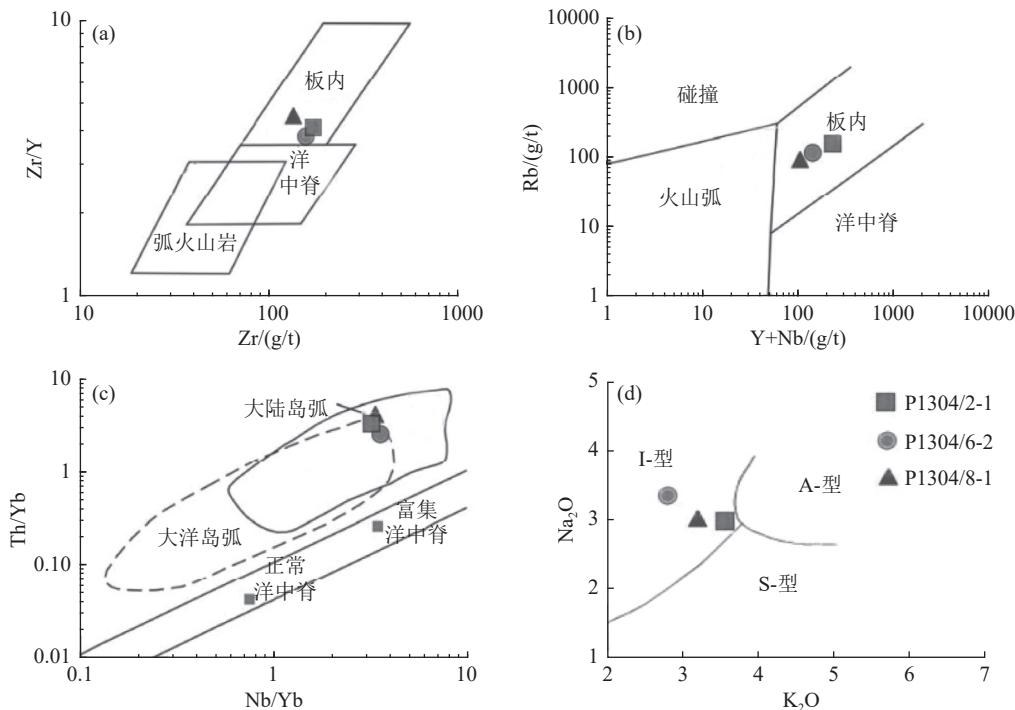


图8 加查堆岩体构造环境判别^[28]
Fig.8 Tectonic discriminant from Jiachadui rock mass

表3 加查堆岩体和邻区其他典型类型火山岩微量元素对比
Table 3 Trace element comparison between Jiachadui rock mass and adjacent areas

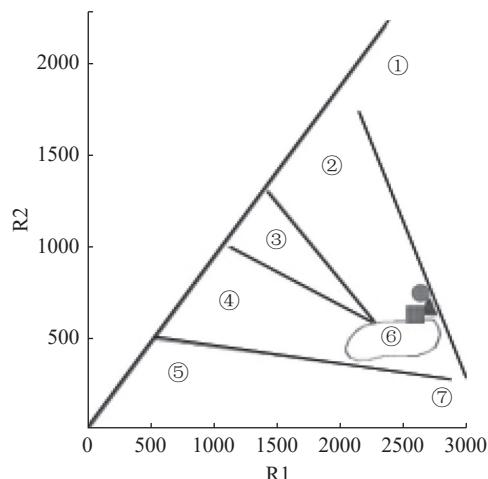
岩石类型	Co	Cr	Zr	V	Sc	Nb	Y	Zr/Y	Sc/Cr	Cr/V	Rb/Sr	Ba/Rb	Ba/Sr
加查堆岩体闪长岩	8.82	16.9	174	66.93	11.43	14.7	43.53	4	0.68	0.25	0.62	3.43	2.14
羌塘安山岩 ^[29]	20.85	33.27	141.09	225.07	27.85	9.28	19.83	7.11	0.84	0.15	0.097	11.45	1.11
啊扎侵入体闪长岩 ^[30]	18.32	16.69	105.32	88.48	-	5.6	8.66	12.16	-	0.19	0.08	8.70	0.71
丝波绒曲花岗闪长岩 ^[31]	11.8	14	136	89.8	7.81	4.27	12.3	11.06	0.56	0.16	0.10	9.81	0.97

Rb、Th、Nd、La、K富集；高场强元素Nb、Ba、U、Ta、Ce、Sm、Ti亏损，与典型岛弧型岩浆相似，显示俯冲作用有关火成岩地球化学特点。样品在R1-R2构造环境判别图解中均投点落入破坏性活动板块边缘（板块碰撞前）花岗岩区域（图9），微量元素（Y+Nb）-Rb图解上2件落入板内区域（图10），1件落入火山弧区域一侧，经历了从板块碰撞前→同碰撞造山过程，显示了岩浆演化过程较长。

4.2 区域构造演化

青藏高原南部冈底斯-喜马拉雅造山带的古地理位置处于冈瓦纳大陆的北部边缘，区域地质调查发现冈底斯带和喜马拉雅带具有一致的元古宙变质岩系，结合喜马拉雅带中早奥陶世花岗岩的岩浆热事件和基底变质岩系中大量451~562 Ma的岩浆锆石年龄数据^[35]，认为冈底斯-喜马拉雅造山带具有550 Ma左右形成的泛非基底^[36]。早古生代时期在泛非基底之上，冈底斯-喜马拉雅地区表现为

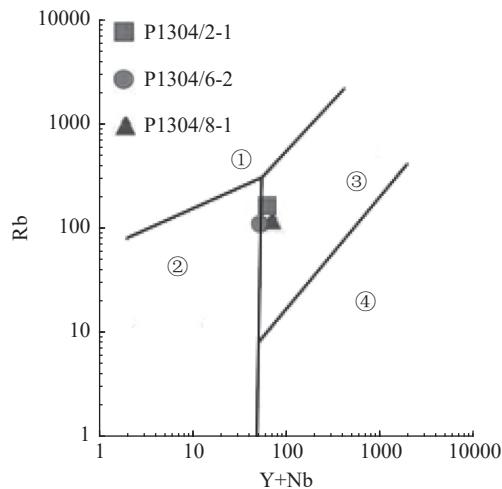
稳定宽阔浅海台型沉积盖层，构造位置属于冈瓦



①地幔斜长花岗岩；②破坏性活动板块边缘（板块碰撞前）花岗岩；③板块碰撞后隆起期花岗岩；④晚造期花岗岩；⑤非造山区A型花岗岩；⑥同碰撞（S型）花岗岩；⑦造山期后A型花岗岩

图9 加查堆岩体R1-R2构造环境判别^[28]
Fig.9 R1-R2 Tectonic discriminant from Jiachadui rock mass

纳大陆北部边缘的被动边缘盆地沉积^[36], 并一直稳定沉积延续至泥盆纪。



①同碰撞花岗岩; ②火山弧花岗岩; ③板内花岗岩; ④洋脊花岗岩
图 10 加查堆岩体 $(Y+Nb)$ -Rb 构造环境判别^[28]

Fig.10 ($(Y+Nb)$) -Rb Tectonic discriminant from Jiachadui rock mass

本次花岗岩样品年龄测试, 确定其形成年代为 (345.3 ± 1.8) Ma; 其年龄与早古生代时期冈瓦纳大陆的聚合时间一致, 自晚古生代石炭纪开始, 由于北侧班公湖-怒江古特提斯大洋向南的俯冲消减作用^[36], 冈瓦纳大陆北部边缘由较稳定的被动边缘台型盆地沉积转化为活动大陆边缘盆地沉积, 从北向南顺序表现为石炭纪-二叠纪冈底斯岛弧→雅鲁藏布江弧后裂谷盆地→喜马拉雅陆缘裂陷盆地的弧盆系空间格局^[37]。在冈底斯带东段江达-维西构造带北部同普岩基边缘相的高硅花岗岩获得锆石 U-Pb 年龄为 (260 ± 1) Ma^[38], 为中二叠世晚期, 认为其来源于古老地壳物质的部分熔融, 与冈底斯带晚古生代火山岩相关的岛弧型花岗岩。啊扎石英二长闪长岩侵入体形成时代为晚白垩世 (95.0 ± 1.4) Ma, (100.2 ± 1.4) Ma^[30] 以及冈底斯南缘东段丝波纹曲出露的复式岩体获得岩体年龄早侏罗世 $(188 \sim 185)$ Ma 角闪辉长岩-英云闪长岩、始新世 (~ 47 Ma) 二长花岗岩-花岗闪长岩^[31], 显示其侵入活动发生于俯冲带环境, 是新特提斯洋洋脊俯冲的产物。以上岩石证据印证了班公湖-怒江古特提斯大洋向南俯冲消减于冈底斯带之下, 导致了冈底斯带石炭纪-二叠纪岛弧型火山岩的喷发、二叠纪花岗岩侵入的形成, 晚古生代新特提斯洋板片持续俯冲, 并诱发了多期次岩浆底侵以及壳幔岩浆混合事件, 这种俯冲作用可能一直持续到古近纪早期。

5 结 论

(1) 加查堆岩体稀土元素总量和轻重稀土元素分异程度均较高, 表现为右倾的轻稀土元素富集型, Eu 亏损型, Ce 具弱负异常, 火山岩相对富集 Rb、Th、Nd、La、K 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ba、U、Ta、Ce、Sm、Ti 等高场强元素, 反映板块俯冲环境中的岛弧火山岩的特征, 属于岛弧型钙碱性系列火山岩, 与区域冈底斯带晚古生代特征一致。

(2) 加查堆花岗闪长岩具有高钾、低钙、弱过铝质钙碱性特点, 富碱和过铝质特征是富角闪石源区深熔产生的深源花岗岩的典型特征。 K/Rb 、 Th/U 、 La/Yb 、 K/U 、 Nb/Ta 值等接近于地壳平均值, 说明加查堆岩体源于中下地壳, 与岛弧火山岩的特征一致; $Zr/Y-Zr$ 及 $Rb-Y+Nb$ 图解、 $Th/Yb-Nb/Yb$ 和 $Rb-Yb+Ta$ 图解亦显示其形成于大陆岛弧环境。岩体高 K_2O/Na_2O 和低 Sr/Ba 值指示该岩石为中性岩浆岩在无水条件下部分熔融的产物, 推断加查堆岩体可能是中下地壳中性岩石部分熔融的产物。

(3) 加查堆岩体构造环境判别图样品投点均落入 I 型花岗岩区, 印证了以上地壳熔融的观点。样品在 R1-R2 构造环境判别图解中均投点落入破坏性活动板块边缘(板块碰撞前)花岗岩区域, 微量元素 $(Y+Nb)$ -Rb 图解显示岩石经历了从板块碰撞前→同碰撞造山过程, 显示了岩浆演化过程较长。

(4) 加查堆岩体测得的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 (345.3 ± 1.8) Ma, 代表了加查堆地区岩浆活动结晶年龄。从区域上看, 西藏冈底斯带石炭纪-二叠纪火山岩近东西向集中分布在冈底斯山北部。空间上, 从东至西火山岩的强度和规模渐次减少; 时间上, 从早石炭世→晚二叠世火山活动的强度、规模总体由弱到强。火山岩组合及其地球化学特征标志着岛弧产生(初始岛弧)→发展(早期岛弧)→成熟(成熟岛弧)的演变过程。

参 考 文 献:

- [1] 黄玉蓬, 邹金汐, 刘清强, 等. 滇西北中甸勇哥碱性杂岩体岩相学和矿物学特征及其地质意义 [J]. 矿产综合利用, 2022(1):103-118.
- HUANG Y P, ZOU J X, LIU Q Q, et al. Petrographical and mineralogical characteristics of Bengge alkaline igneous complex in Zhongdian, Western Yunnan and its geological significance[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,

- 2022(1):103-118.
- [2] 翟明国. 花岗岩: 大陆地质研究的突破口以及若干关键科学问题——“岩石学报”花岗岩专辑代序[J]. 岩石学报, 2017, 33(5):1369-1380.
- ZHAI M G. Granites: leading study issue for continental evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(5):1369-1380.
- [3] 王孝磊. 花岗岩研究的若干新进展与主要科学问题[J]. 岩石学报, 2017, 33(5):1445-1458.
- WANG X L. Some new research progresses and main scientific problems of granitic rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(5):1445-1458.
- [4] 张旗. 有关埃达克岩实验应用中几个问题的探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 2015, 34(2):257-270.
- ZHANG Q. A tentative discussion on the experimental study of adakite[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2015, 34(2):257-270.
- [5] 谭洪旗, 朱志敏, 周雄, 等. 川西九龙地区两期伟晶岩型稀有金属成矿作用[J]. 矿产综合利用, 2022(1):18-28.
- TAN H Q, ZHU Z M, ZHOU X, et al. Two periods rare metal mineralization of the pegmatite in Jiulong Area, Western Sichuan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(1):18-28.
- [6] 徐夕生, 贺振宇. 花岗岩研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31(3):205-209.
- XU X S, HE Z Y. Progress in granite studies[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2012, 31(3):205-209.
- [7] 张旗, 焦守涛, 李承东, 等. 花岗岩与大陆构造、岩浆热场与成矿[J]. 岩石学报, 2017, 33(5):1524-1540.
- ZHANG Q, JIAO S T, LI C D, et al. Granite and continental tectonics, magma thermal field and metallgenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(5):1524-1540.
- [8] 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报, 2006, 22(3):521-533.
- PAN G T, MO X X, HOU Z Q, et al. Spatial-temporal framework of the Gangdese Orogenic Belt and its evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(3):521-533.
- [9] 莫宣学, 潘桂棠. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束[J]. 地学前缘, 2006, 13(6):43-51.
- MO X X, PAN G T. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet Plateau: constrained by tectono-magmatic events[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(6):43-51.
- [10] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogeny[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28(1):211-280.
- [11] Ma Y, Yang T, Yang Z, et al. Paleomagnetism and U-Pb zircon geochronology of Lower Cretaceous lava flows from the western Lhasa terrane: New constraints on the India-Asiacollision process and intracontinental deformation within Asia[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2014, 119:7404-7424.
- [12] Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2004, 28(3): 353-370.
- [13] 谭细娟, 郭超, 凤永刚, 等. 激光剥蚀系统气体流速变化对LA-ICP-MS锆石U-Pb定年精度的影响[J]. 岩矿测试, 2022, 41(4):554-563.
- TAN X J, GUO C, FENG Y G, et al. Effect of gas flow rates in laser ablation system on accuracy and precision of zircon U-Pb dating analysis by LA-ICP-MS[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2022, 41(4):554-563.
- [14] Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rock[J]. *s. Canad. J. Earth. Sci.*, 1971(8):523-548.
- [15] Middlemost E A K. Naming materials in magma-igneous rock system[J]. *Earth Sci. Rev.*, 1994(37):215-224.
- [16] Richwood P C. Boundary lines within petrologic diaframs which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 1989(22):247-263.
- [17] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalt: implications for mantle composition and processes[J]. Sanders A D, Norry M J(Eds.), *Magmatism in the Ocean Basins: Geological Society Special Publication*. 1989(24) pp. 313-345.
- [18] Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. Review of global 2.1-1.8 Gaorogens: implications for a pre-Rodinia supercontinent[J]. *Earth Science Review*, 2002(59):125-162.
- [19] Boynton W W. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[M]. In: Henderson P, ed. *Rare Earth Element Geochemistry: Developments in Geochemistry*, Amstordam: Elsevier, 1984, 63-114.
- [20] Rowley DB. Stable isotope-based paleoaltimetry: Theory and Validation[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2007, 66: 23-52.
- [21] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对U-Pb年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16):1588-1604.
- WU Y B, ZHENG Y F. Zircon genetic mineralogy and its constraints on the interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(16):1588-1604.
- [22] Whitney J a. The origin of granite: the role and source of water in the evolution of granitic magmas[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1988(100):1886-1897.
- [23] Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 1999(46):605-626.
- [24] Dostal J, et al. Volcanism in the central western Carpathians(Slovakia): basin-and range type rifting in the southern Laurussian margin[J]. *Internal Journal of Earth Sciences*, 2003, 92(1):27-35.
- [25] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust[M]. In: Rudnick R L, eds. *The Crust. Treaties on Geochemistry*, 3. Oxford: Elsevier Pergamon, 2003, 1-64.

- [26] Crawford AJ, Falloon TJ, and Egging S. The origin of island arc high-aluminabasalts[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 97, 1987, 417–430.
- [27] Zhu DC, Mo XX, Zhao ZD, et al. Presence of Permian extension- and arc-typemagmatism in southern Tibet: Paleogeographic implications[J]. GSA Bulletin. 2010, 122: 979–993.
- [28] Collis W J, et al. Nature and origin of A type gianites with paticular reference to Southeastern Australia[J]. Contrib. Miner. Petro., 1982(80):189-200.
- [29] 江庆源. 西藏羌塘中部早石炭世弧火山岩的发现及其构造意义[D]. 吉林: 吉林大学. 2015.
- JIANG Q Y. The discovery and tectonic implications of early Carboniferous arc magmatism in central Qiangtang, Xizang Plateau[D]. Jilin: Jilin University. 2015.
- [30] 欧新锋, 杨峰, 康志强, 等. 西藏拉萨地块南部啊扎侵入体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其对新特提斯洋演化历史的指示[J]. 地质通报, 2022, 41(5):774-787.
- OU X F, YANG F, KANG Z Q, et al. Zircon U-Pb age and geochemical characteristics of the Azha intrusion in the southern Lhasa Block, Tibet and their indications for the evolutionary history of the Neo-Tethys[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(5):774-787.
- [31] 李艳芳, 邱检生, 王睿强, 等. 冈底斯东段加查县丝波绒曲早侏罗-始新世复式岩体成因及其对构造演化的启示[J]. 地质学报, 2019, 93(12):3020-3046.
- LI Y F, QIU J S, WANG R Q, et al. Petrogenesis of the early Jurassic-Eocene composite pluton in Siborongqu, Gyaca County, eastern segment of the Gangdese Belt, and its tectonic implications[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(12):3020-3046.
- [32] 王文鲁, 等. 西藏南部冈底斯带东段晚白垩世中性侵入岩的成因矿物学研究: 对构建穿地壳岩浆系统的启示[J/OL]. 地学前缘. 2022: 1-39.
- WANG W L, et al. Research of genetic mineralogy of late Cretaceous intermediate intrusive rocks in the eastern segment of the Gangdese Belt, Southern Tibet: construction of a trans-crustal magma system[J/OL]. Earth Science Frontiers. 2022: 1-
- 39.
- [33] Pin C, Paquette J L. A mantle-derived bimodal suite in the Hercynian Belt: Nd-isotope and trace element evidence for a subduction-related rift origin of the late Devonian Brevenne metavolcanics, Massif Central (France)[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology. 1997(129): 222–238.
- [34] Zhu D C, Pan G T, Mo X X, et al. Petrogenesis of volcanic rocks in the Sangxiu Formation, central segment of Tethyan Himalaya: a probable example of plume-lithosphere interaction[J]. Journal of Asian Earth Sciences. 2007(29): 320–335.
- [35] 刘文灿, 万晓樵, 梁定益, 等. 江孜县幅、亚东县幅地质调查新成果及主要进展[J]. 地质通报, 2004, 23(5-6):444-450.
- LIU W C, WAN X Q, LIANG D Y, et al. New achievements and main progress in geological survey of the Gyangze and Yadong sheets[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(5-6):444-450.
- [36] 潘桂棠, 朱弟成, 王立全, 等. 班公湖-怒江缝合带作为冈瓦纳大陆北界的地质地球物理证据[J]. 地学前缘, 2004, 11(4):371-382.
- PAN G T, ZHU D C, WANG L Q, et al. Bangong Lake-Nu River suture zone—the northern boundary of Gondwanaland: Evidence from geology and geophysics[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(4):371-382.
- [37] 王立全, 等. 西藏冈底斯带石炭纪一二叠纪岛弧造山作用: 火山岩和地球化学证据[J]. 地质通报. 2008, 27(98): 1509-1534.
- WANG L Q, et al. Carboniferous-Permian island arc orogenesis in the Gangdese belt, Tibet, China: evidence from volcanic rocks and geochemistry[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(98): 1509-1534.
- [38] 周士旭, 等. 藏东同普二叠纪高分异花岗岩的锆石 U-Pb 年龄和岩石成因[J]. 岩石学报. 2017, 33(8)-2509-22.
- ZHOU S X, et al. Zircon U-Pb age and petrogenesis of the Permian highly fractionated granites in Tongpu, eastern Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica. 2017, 33(8)-2509-22.

Geochronology and Geochemistry of the Jiachadui Ganodiorite in Xizang and its Geological Implications

YONGZHONGLADA¹, LU Junyong², SUOLANGDUNDAN¹, LUO Xinghai², ZHU Jianhua²

(1.No. 2 Geological Brigade of Xizang (Autonomous Region) Bureau of Exploration & Development of Geology & Mineral Resources, Lasa 850000, Xizang, China; 2.207 Geological Brigade of Sichuan Bureau of Exploration & Development of Geology & Mineral Resources, Leshan 614000, Sichuan, China)

Abstract: This is an article in the field of earth sciences. Magmatic rocks of the Gondwana Belt are one of the most popular problems in basic geological research on the Xizang-Qinghai Plateau. In this paper, we analyze the physical origin and regional tectonic properties of the Gachatai granite using LA-ICP-MS zircon U-Pb dating method, combined with the geochemical characteristics of the rocks and various graphical

(下转第 134 页)

ZHENG L, ZHANG D, LIU Y C. The study on flotation properties of sphalerite in high alkalinity medium in fankou lead-zinc mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2005(3):37-40.

[39] Grano Stephen, Huang Guozhi. Improving the flotation behavior of a sulfide ore by controlling electrochemical

interactions during grinding[J]. *ECS Transactions*, 2006, 2(3):9-20.

[40] Liang Yi Qiang, Zhang Xu Dong, Zhang Han Ping, et al. Using a new bulk flotation process to enhance the recovery of mineral beneficiation in a lead-zinc sulfide-oxide mixed ore[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 634-638:3545-3550.

Research Progress on the Effect of Inevitable Ions in Slurry on the Separation of Lead-Zinc Sulfide Ore

XU Hongxiang^{1,2}, PANG Zengrui², LI Quan¹, HU Mingzhen¹, DENG Jiushuai², ZHANG Qian²

(1.Postdoctoral Research Station, National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Indium and Tin Resources, Guangxi Huatin Group Co., Ltd., Liuzhou 545200, Guangxi, China; 2.School of Chemistry and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: This is an article in the field of mineral processing engineering. Some unavoidable ions commonly present in the slurry solution have an important influence on the flotation separation of lead-zinc sulfide ore. The unavoidable ions in the slurry mainly come from the water used in the processing plant, the dissolution of minerals, the dissociation of activators or depressants, and the primary ions introduced by the release of fluid inclusions and the secondary ions introduced during the grinding process. This article summarizes and analyzes the effects on the flotation separation of lead-zinc sulfide ore which is caused by the primary ions introduced in the slurry and the secondary inevitable ions introduced in the grinding system. It is found that both primary ions and secondary ions have obvious effects on the flotation behavior of lead-zinc sulfide ore. And many scholars have done a lot of research on this phenomenon. In this paper, a great breakthrough has been made through the adjustment and control of reagents and changes in the grinding environment. At the same time, this article provides important research ideas for follow-up researchers. The focus of this article is how to integrate the previous research results with the field process significantly, how to eliminate inevitable ions from the source without affecting the industrial economy, The important direction of future research is still how to reduce the influence of inevitable ions on the flotation index from the field process.

Keywords: Mineral processing engineering; Inevitable ions in pulp; Lead-zinc sulfide ore; Flotation separation; Grinding system

(上接第 108 页)

methods. The rocks are characterized by high alkali (average $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ content of 6.26%), potassium ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=1.03$), low TiO_2 (average 0.50%) and quasi-aluminous (aluminum saturation index $\text{A/CNK}=0.933 \sim 1.033$, average 0.991) high potassium-calcium-alkaline rock system. Rare earth elements show negative anomalies at Eu, which is the Eu-deficient type, and Ce has weak negative anomalies; trace elements show enrichment of large ion-parental elements Rb, Th, Nd, La and K; high field strength elements Nb, Ba, U, Ta, Ce, Sm and Ti are deficient; reflecting the mixed crust-mantle type of magma origin and the presence of subduction oceanic crustal melting. The zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic age is (345.3 ± 1.8) Ma, and its formation age is Early Carboniferous. The analysis of the regional geological data suggests that this magmatic event is a product of the formation of the northern part of the eastern Gondwana continent after the breakup of the Rodinia supercontinent. The project points go to I-type granite, the discriminant diagrams indicate it's formed from continental island arc, going through time before plate collision to collisional orogenic movement, which indicates a long period time of magmatic evolution; the rock geochemical characteristics show the environment of magmatic evolution changed from the start of island arc(primary island arc)-development(early stage island arc)-maturement(full-grown island arc).

Keywords: Earth sciences; LA-ICPMS U-Pb dating; Zircon trace elements; Jiacha; Early Carboniferous; Granitic amphibolite