

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.12.010

东昆仑黑刺沟金矿区晚奥陶世花岗斑岩的成因: 锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学和 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素制约

李积清, 王秉璋*, 王涛, 王明, 李青, 马永成

LI Jiqing, WANG Bingzhang*, WANG Tao, WANG Ming, LI Qing, MA Yongcheng

青海省地质调查院/青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室, 青海 西宁 810012

Geological Survey Institute/Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources in the Northern Part of Qinghai-Tibet Plateau, Xining 810012, Qinghai, China

摘要:黑刺沟金矿区位于东昆仑造山带西段,区内花岗斑岩呈脉状沿北西向构造与金矿化带近平行产出,是近年勘查工作新圈定的与金矿化有成因关系的酸性岩脉。对研究区花岗斑岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,全岩地球化学及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素研究,探讨其形成时代、岩石成因、构造环境、岩浆源区等。研究结果表明,花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄为 445.8 ± 2.4 Ma (MSWD=0.36),形成时间为晚奥陶世。岩石 SiO_2 含量在 75.17%~78.94% 之间, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 含量为 5.49%~7.07%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=0.01\sim 0.03$, 相对贫钾富钠, 贫 MnO (0.05%~0.07%)、MgO (0.08%~0.25%)、 P_2O_5 (0.07%~0.08%) 和 TiO_2 (0.15%~0.18%), 属低钙钾碱性岩石系列。A/CNK 值为 0.92~0.99, A/NK 值为 1.1~1.14, 为准铝质岩石。稀土元素总量介于 $132.4 \times 10^{-6} \sim 183.95 \times 10^{-6}$ 之间, LREE/HREE=8.04~8.78, 微量元素显示 Ba、Th、Pb 相对富集, K、P、Ti 亏损, 微量元素组成特征具有 I 型花岗岩特征。Sr-Nd-Pb-Hf 同位素显示, 样品具有高的 I_{Sr} 值 (0.7133~0.7158), 低 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (-4.45~-5.15), t_{DM} 年龄为 1.54~1.6 Ga, 初始铅同位素比值 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i = 18.218~18.375, ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i = 15.63~15.738, ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i = 38.22~38.544, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -11.12~+0.13, $t_{\text{DM2}}=1.42\sim 1.65$ Ga。综合认为, 花岗斑岩形成于晚奥陶世原特提斯洋向北俯冲消减环境下的陆缘弧环境, 岩浆来源于下地壳中—古元古代物质的部分熔融。

关键词:黑刺沟花岗斑岩; 岩石成因; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄; Sr-Nd-Pb-Hf 同位素; 全岩地球化学; 晚奥陶世
中图分类号: P534.42; P595; P597⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)12-2173-13

Li J Q, Wang B Z, Wang T, Wang M, Li Q, Ma Y C. Genesis of Late Ordovician granite porphyry at Heicigou gold deposit, East Kunlun: constraints from zircon U-Pb age, geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic systematics. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(12): 2173-2185

Abstract: The Heicigou gold deposit is located in the southern segment of the East Kunlun Orogen. The granite porphyry in the area which is parallel to the gold metallogenic belt along the NW trending structure, is a newly delineated felsic dike related to the gold mineralization in recent years. Based on LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, Sr-Nd-Pb-Hf isotopic systematics, and whole-rock geochemistry, the formation age, petrogenesis, tectonic setting, and magma source of the granite porphyry are discussed in detail. The results show that the zircon U-Pb age of the granite porphyry is 445.8 ± 2.4 Ma (MSWD = 0.36), indicating an age of the Late Ordovician. The granite porphyry contains 75.17%~78.94% SiO_2 , 10.22%~12.8% Al_2O_3 , 5.49%~7.07% $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$

收稿日期: 2020-03-27; 修订日期: 2020-06-22

资助项目: 国家自然科学基金项目《柴北缘花岗伟晶岩型锂铍等关键金属超常富集成矿的可能机制》(批准号: 9206220026) 和青海省应用基础研究项目《青海省布青山地区金多金属成矿作用及找矿方向研究》(编号: 2018-ZJ-773)

作者简介: 李积清(1985-), 男, 高级工程师, 从事地质矿产及综合地质调查研究。E-mail: lijing8999@163.com

* 通信作者: 王秉璋(1969-), 男, 博士, 正高级工程师, 从事区域地质矿产调查。E-mail: wzb6901@126.com

ranging from 0.01 to 0.03, 0.05%~0.07% MnO, 0.08%~0.25% MgO, 0.07%~0.08% P₂O₅, and 0.15%~0.18% TiO₂, suggesting that the rock belongs to the low-K calc-alkaline rock series. The A/CNK and A/NK values are 0.92~0.99 and 1.1~1.14, respectively, indicating that the rock is metaluminous. The Σ REE concentration ranges from 132.4×10⁻⁶ to 183.95×10⁻⁶, with the LREE/HREE ratios varying between 8.04 and 8.78. The primitive mantle-normalized trace element spidergrams are characterized by enrichment in Ba, Th, and Pb and depletion in Nb, Ta, and Ti, similar to I-type granites in volcanic arc settings. The granite porphyry exhibits high I_s (0.7133~0.7158), (²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb)_i but low ε_{Nd}(*t*) (-4.45~-5.15) and ε_{Hf}(*t*) (-11.12~+0.13), similar to magmas derived from the lower crust. It is believed that the granite porphyry was formed in a continental margin arc setting due to the northward subduction of the Proto-Tethys Ocean in the Late Ordovician, and that the magma was originated from the partial melting of the lower crust.

Key words: Heicigou granite porphyry; petrogenesis; LA-ICP-MS zircon U-Pb age; Sr-Nd-Pb-Hf isotopes; whole-rock geochemistry; Late Ordovician

东昆仑造山带位于青海省中部,夹持于柴达木陆块和古特提斯北侧的陆缘活动带,有着复杂的地质构造演化历史,也是省内重要的铁多金属成矿带之一,俗有“千吨金腰带”之称^[1]。研究区主要经历了与新元古代—早古生代原特提斯洋和晚古生代—三叠纪古特提斯洋演化相关的2期造山旋回^[2-3],昆中缝合带和昆南缝合带分别代表原特提斯洋和古特提斯洋的闭合边界^[4]。目前东昆仑造山带岩浆岩的研究主要集中在东段,西段研究较薄弱^[5],特别是早古生代原特提斯洋的演化过程争议较大^[4]。前人^[6-7]通过对东昆北地体内早古生代中酸性岩、镁铁质岩和变质岩构造属性研究,将原特提斯洋北向俯冲时间限定为451~436 Ma,然而对其源区特征、岩体成因及其与金矿关系的研究鲜见报道。

黑刺沟金矿床位于青海省格尔木市西南约150 km处,是近年矿产勘查新发现的小型金矿床。该区花岗斑岩也是近年来勘查工作新圈定的岩体,从岩体和金矿化带的空间展布特征看,区内花岗斑岩和金矿化具有一定关系。通过对黑刺沟金矿区出露的花岗斑岩进行详细的LA-ICP-MS锆石U-Pb定年、全岩地球化学,锆石Hf同位素和Sr-Nb-Pb同位素分析,限定黑刺沟金矿区花岗斑岩的成岩时代,查明源区特征、岩石成因,探讨岩石形成过程及其构造背景。

1 地质背景

黑刺沟金矿区夹持于昆中断裂和昆南断裂之间,大地构造位置处于东昆仑南坡俯冲增生杂岩带(图1-a)。研究区出露中新元古代、古生代、中生代、新生代地层,其中万宝沟群青办食宿站组(Pt₂₋₃q)为一套碳酸盐岩地层,奥陶纪—志留纪纳赤台群哈

拉巴依沟组(OSh)岩性主要为硅化灰岩、板岩及砾岩,石灰厂组(OSs)岩性为长石石英变砂岩、板岩和玄武岩,早三叠世洪水川组(T₁h)岩性为石英砂岩、长石砂岩、粉砂岩、砾岩,早—中三叠世闹仓坚沟组(T₁₋₂n)为一套浅海相碳酸盐岩建造,中三叠世希里可特组(T₂x)为砂岩—粉砂岩—灰岩建造(图1-b)。

受东昆中、东昆南断裂影响,区内次级北西向、北东向断裂构造较发育,其中以北西向为主,也是区内主要的控矿构造。已知金矿化带严格受北西向断裂构造控制,与金矿化关系最密切。含金破碎带内断层角砾岩、糜棱岩化岩石、碎裂岩化岩石、挤压片理等均较发育。

区内岩浆活动不发育,仅在奥陶纪—志留纪纳赤台群中见少量呈断块(夹片)产出的强片理化玄武岩。此外,沿金矿化带两侧发育少量的条带状花岗斑岩,是本次研究的主要对象。花岗斑岩主要沿北西向构造薄弱面断续产出,平面上呈北西—南东向条带状展布,与黑刺沟地区金矿化带并列分布,长760~1000 m,宽10~30 m。花岗斑岩体主要侵入奥陶纪—志留纪纳赤台群石灰厂组灰绿色板岩和玄武岩(图1-b),局部与早三叠世洪水川组下段粉砂岩呈断层接触,区内已知的金矿(化)体主要分布于花岗斑岩与围岩的接触带,接触带附近发生硅化、绢云母化、黄铁矿化等。从花岗斑岩、金矿化带空间分布特征推测,其可能与区内金矿化有关。

2 岩相学特征

花岗斑岩呈灰褐色,具斑状结构,块状构造,基质具细微粒花岗结构。岩石主要由斑晶(25%~27%)、基质(73%~75%)和裂隙充填物(2%~3%)组成。斑晶由钾长石(10%~13%)、石英(7%~8%)和少量的酸性斜长石(3%~4%)组成,斑晶大小多

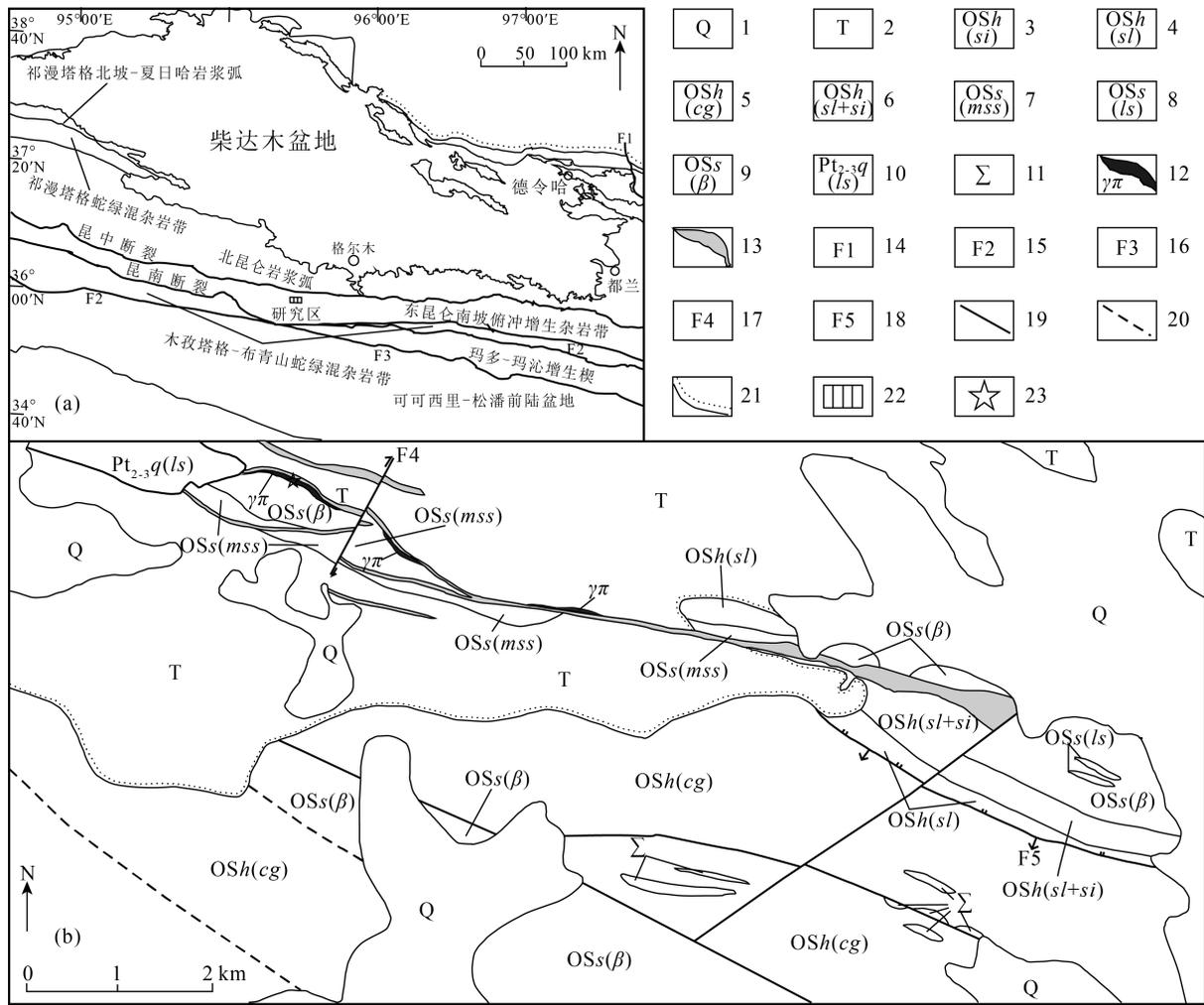


图 1 研究区大地构造位置简图(a)及黑刺沟金矿区地质简图(b)

Fig. 1 Simplified tectonics map (a) and geological map of the Heicigou gold deposit (b)

1—第四系;2—三叠系砾岩、砂岩、粉砂岩夹灰岩;3—奥陶系-志留系纳赤台群哈拉巴依沟组灰白色硅化灰岩;4—奥陶系-志留系纳赤台群哈拉巴依沟组灰绿色板岩;5—奥陶系-志留系纳赤台群哈拉巴依沟组浅灰色砾岩;6—奥陶系-志留系纳赤台群哈拉巴依沟组灰绿色板岩夹灰白色硅化灰岩;7—奥陶系-志留系纳赤台群石灰厂组长石石英变砂岩;8—奥陶系-志留系纳赤台群石灰厂组灰绿色板岩;9—奥陶系-志留系纳赤台群石灰厂组玄武岩;10—中元古代万宝沟群青办食宿站组青灰色灰岩;11—超基性岩;12—花岗岩;13—金矿化带;14—哇洪山-温泉断裂;15—布青山南缘断裂;16—昆仑山口-甘德断裂;17—走滑断层;18—逆断层;19—性质不明断层;20—推测断层;21—角度不整合界线;22—研究区;23—采样位置

在 0.22 mm×0.31 mm~3.2 mm×4.8 mm 之间,其中钾长石呈半自形粒状晶,为条纹长石,具粘土化和碳酸盐化蚀变。受构造作用发生破裂,钾长石晶体内不规则状裂纹发育,沿裂纹多被后期碳酸盐矿物充填呈断续脉状分布,另外在钾长石晶内见有斜长石微晶嵌入,但含量极少;石英呈他形粒状晶,晶内裂纹发育,具明显的波状消光,局部碎裂岩化特征极明显;斜长石呈半自形板状晶,晶内裂纹发育,受动力作用,斜长石略呈弯曲,具轻微绢云母化、碳酸

盐化蚀变,镜下斜长石斑晶分布不均,局部呈聚斑状分布;基质由细微粒状长英质矿物(69%)、少量的绢云母和不透明金属矿物(4%)组成,其中长英质矿物呈细微粒状,成分为钾长石、石英、斜长石,晶粒大多在 0.1 mm 以下,呈集合体状充填于斑晶和斑晶间的裂纹间隙,绢云母呈细小鳞片状集合体,在岩石局部裂隙中充填,含量极少,不透明金属矿物呈半自形—他形粒状晶和微粒状集合体,分布于岩石裂隙中;另外岩石因受构造作用斑晶发生破

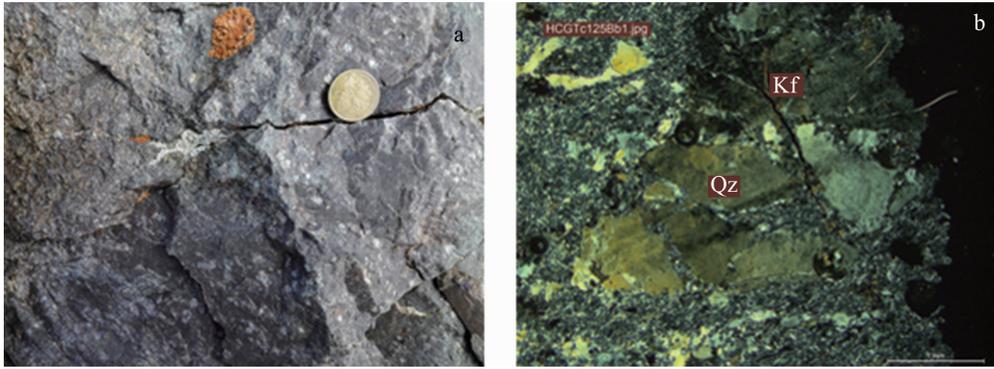


图2 花岗斑岩手标本(a)和显微镜下照片(b,正交偏光)

Fig. 2 Hand specimen (a) and microphotograph (b, cross-polarized light) of the granite porphyry
Qz—石英;Kf—钾长石

裂,裂隙被碳酸盐矿物充填,呈脉状分布,脉体穿越斑晶,脉宽约0.045 mm。

3 样品采集与分析方法

本次在黑刺沟金矿区针对花岗斑岩采集1件锆石U-Pb测年(锆石原位Lu-Hf同位素测定)样品、4件全岩地球化学样品(主量、稀土和微量元素)和4件全岩Sr-Nd-Pb同位素样品进行分析测试。花岗斑岩采样坐标为东经93°55'47.878"、北纬35°59'48.862",具体采样位置见图1-b。

3.1 地球化学分析

主量和微量元素测试在湖北武汉综合岩矿测试中心完成。主量元素分析测试采用X荧光光谱法(XRF)完成,分析仪器为菲利普PW2440型波长色散X-射线荧光光谱仪,分析误差小于0.9%;稀土元素采用阳离子交换分离-电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES),分析误差小于4.8%;微量元素采用电感耦合等离子质谱法(ICP-MS),测试仪器采用美国热电公司X7电感耦合等离子质谱仪,分析误差小于7.8%。

3.2 锆石U-Pb测年及Lu-Hf同位素分析

锆石的分选、制靶及阴极发光(CL)显微照相在河北省廊坊市区域地质调查研究所实验室完成。锆石U-Pb同位素定年和原位Lu-Hf同位素在北京燕都中实测试技术有限公司实验室完成。U-Pb同位素定年中激光剥蚀系统为NewWave UP213,ICP-MS为布鲁克M90,锆石标准采用91500和Plesovice作为外标进行同位素分馏校正,剥蚀光斑直径25

μm。普通铅计算按3D坐标法进行校正^[8],样品的同位素比值和元素含量计算采用Glitter 4.4软件处理,锆石的谐和曲线和加权年龄平均值计算采用Isoplot 3.2等程序完成^[9]。锆石原位Lu-Hf同位素分析用美国热电Neptune-plus MC-ICP-MS与NewWave UP213激光烧蚀进样系统测试。锆石剥蚀使用频率8 Hz、能量为16 J/cm²的激光剥蚀31 s,由于锆石中的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf值极低(一般小于0.002),¹⁷⁶Lu对¹⁷⁶Hf的同位素干扰可以忽略不计,每个测试点的¹⁷³Yb/¹⁷²Yb平均值用于计算Yb的分馏系数,然后再扣除¹⁷⁶Yb对¹⁷⁶Hf的同质异位素干扰。¹⁷³Yb/¹⁷²Yb同位素比值为1.35274。

3.3 Sr-Nd-Pb同位素分析

4件样品全岩Sr-Nd-Pb同位素分析在南京聚谱检测科技有限公司完成。岩石粉末经高压密闭溶样弹消解后,同位素溶液经Cetac Aridus II膜去溶系统引入,在Nu Plasma II MC-ICP-MS上测定同位素比值。Sr同位素测试用⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.1194按照指数法则进行内部校正,质量监控样品选用NBS 987,全流程过程本底小于20 pg。Nd同位素比值测定过程中,采用¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.7219校正仪器质量分馏,Nd同位素国际标准物质JNdi-1为外标,全流程过程本底小于20 pg。Pb同位素比值测定过程中,采用²⁰⁵Tl/²⁰³Tl=2.3885校正仪器质量分馏,并用NBS981进行外部校正。用美国地质调查局USGS地球化学标准岩石粉末(玄武岩BCR-2、玄武岩BHVO-2、安山岩AGV-2和流纹岩RGM-2)作为质量监控盲样。

4 分析结果

4.1 地球化学元素特征

黑刺沟金矿区主量、微量及稀土元素分析结果见表 1。

黑刺沟花岗斑岩 SiO₂ 含量在 75.17% ~ 78.94%

之间,具有高 SiO₂ 含量的特征,Al₂O₃ 含量在 10.22% ~ 12.80% 之间,Na₂O+K₂O 含量在 5.49% ~ 7.07% 之间,具有富钠特征(K₂O 平均含量 0.1%,Na₂O 平均含量 6.35%,K₂O/Na₂O=0.01~0.03),MnO 平均含量为 0.06%,MgO 平均含量为 0.17%,CaO 平均含量为 0.86%,P₂O₅ 平均含量为 0.08%;在 SiO₂-(Na₂O+K₂O)

表 1 黑刺沟金矿区花岗斑岩地球化学数据

Table 1 Whole-rock geochemical data of the granite porphyry in the Heicigou gold deposit

样品号	HCG-1	HCG-2	HCG-3	HCG-4	样品号	HCG-1	HCG-2	HCG-3	HCG-4
SiO ₂	76.83	76.66	78.94	75.17	F	138.60	126.70	126.30	150.30
TiO ₂	0.17	0.18	0.15	0.17	Au	256.00	458.00	424.00	285.00
Al ₂ O ₃	12.02	11.92	10.22	12.80	Cu	204.50	662.00	198.70	20.33
Fe ₂ O ₃	1.64	1.87	1.15	1.45	Pb	318.30	1199.00	878.90	1328.00
FeO	0.42	0.27	0.58	0.40	Zn	59.02	21.84	57.84	2502.00
MnO	0.05	0.06	0.06	0.07	Ag	2.58	8.58	11.35	4.04
MgO	0.12	0.08	0.22	0.25	La	38.74	33.88	26.97	41.15
CaO	0.74	0.87	1.01	0.82	Ce	71.07	63.67	54.04	75.91
Na ₂ O	6.55	6.53	5.42	6.89	Pr	8.30	7.33	6.63	8.72
K ₂ O	0.08	0.06	0.07	0.19	Nd	30.25	26.67	24.50	31.65
P ₂ O ₅	0.08	0.08	0.07	0.07	Sm	6.32	5.87	5.32	6.69
烧失量	0.90	1.03	1.51	1.27	Eu	0.67	0.63	0.66	0.53
总计	99.61	99.63	99.40	99.56	Gd	5.52	5.51	4.58	6.07
Rb	2.99	1.34	3.33	2.30	Tb	0.94	0.89	0.76	1.01
Ba	1567.00	2152.65	6144.29	795.32	Dy	5.02	4.85	4.02	5.48
Th	19.22	24.41	23.42	22.35	Ho	0.89	0.85	0.72	1.00
U	2.89	4.11	4.39	2.31	Er	2.37	2.27	1.84	2.58
Nb	12.28	15.48	12.02	14.46	Tm	0.36	0.34	0.29	0.39
Ta	1.57	2.37	1.97	2.27	Yb	2.24	2.15	1.81	2.41
Sr	83.85	97.40	125.77	86.67	Lu	0.35	0.32	0.28	0.36
Zr	96.03	99.20	80.98	104.25	Y	26.20	25.23	20.22	29.30
Hf	2.99	3.65	2.99	3.49	ΣREE	173.06	155.22	132.40	183.95
Sc	5.78	5.17	4.98	4.77	LREE	155.36	138.04	118.11	164.64
W	14.74	13.41	9.78	20.47	HREE	17.70	17.18	14.29	19.30
Sn	6.65	7.54	6.07	11.68	LREE/HREE	8.78	8.04	8.26	8.53
Bi	1.67	9.56	3.46	0.31	La _N /Yb _N	12.41	11.32	10.68	12.26
Mo	0.18	0.26	0.15	0.42	δEu	0.35	0.34	0.41	0.25
V	19.88	19.29	16.45	18.99	δCe	0.97	0.99	0.99	0.98
Li	3.45	3.52	4.11	1.92	A/CNK	0.99	0.96	0.92	0.99
Be	0.81	0.88	0.63	1.08	σ	1.30	1.28	0.84	1.55

注:A/CNK=(Al₂O₃)/(CaO+K₂O+Na₂O)摩尔分数比;里特曼指数σ=(K₂O+Na₂O)²/(SiO₂-43)。主量元素含量单位为%,微量元素中 Au 含量单位为 10⁻⁹,其余元素及稀土元素含量单位为 10⁻⁶

图解(图3-a)中,样品点落入亚碱性花岗岩区域;花岗斑岩 A/CNK 值在 0.92~0.99 之间,平均值 0.97 (<1.1),里特曼指数 σ 介于 0.84~1.55 之间(<3.3),属钙碱性系列,在 A/CNK-A/NK 图解(图4-a)中,样品点均落入准铝质区域,在 AFM 图解(图3-b)上,均落入钙碱性系列岩浆区域,在 An-Or-Ab 图解(图4-b)上,样品点均落入奥长花岗岩区域,说明黑刺沟花岗斑岩具有低铝奥长花岗岩特征。综合上述特征表明,黑刺沟花岗斑岩具有富硅、铝,贫锰、镁、钾特点,总体显示低钾钙碱性准铝质花岗岩特点。

岩石 $\Sigma\text{REE} = 132.4 \times 10^{-6} \sim 183.95 \times 10^{-6}$, 其中 $\Sigma\text{LREE} = 118.11 \times 10^{-6} \sim 164.64 \times 10^{-6}$, $\Sigma\text{HREE} = 14.29 \times 10^{-6} \sim 19.3 \times 10^{-6}$, $\text{LREE}/\text{HREE} = 8.04 \sim 8.78$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 10.68 \sim 12.41$, 轻、重稀土元素分馏明显,轻稀土元素与重稀土元素相比较富集,稀土元素球粒陨石配分图(图5-a)呈现出明显的右倾,属于轻稀土元素富集型;岩石具负 Eu 异常, δEu 值为 0.25~0.41, 平均 0.34。

在原始地幔标准化的微量元素蛛网图(图5-b)上,花岗斑岩微量元素相对富集 Nb、Ta、Zr、Hf、Th、

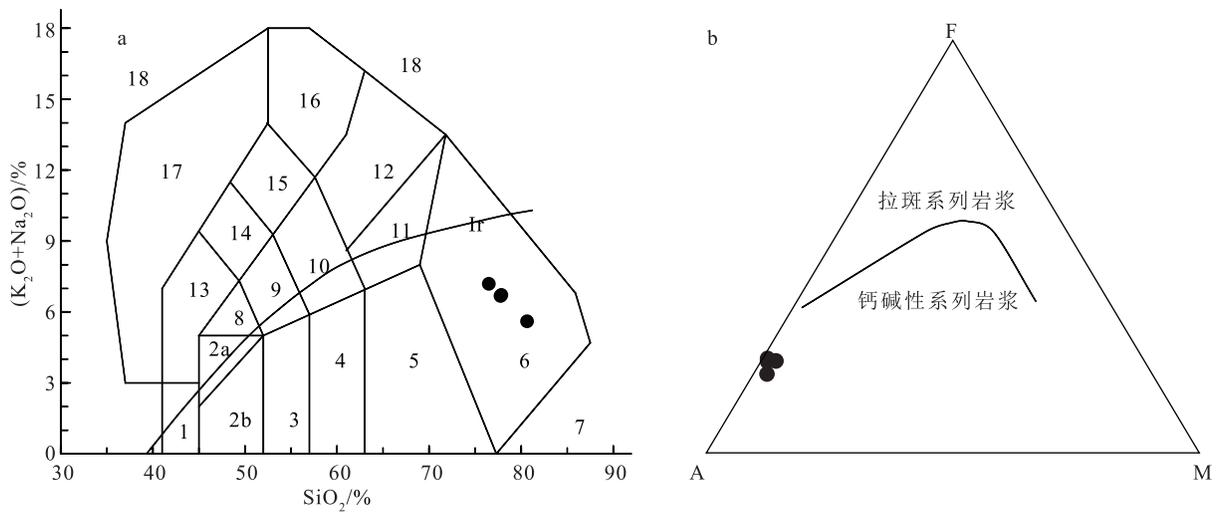


图3 黑刺沟金矿区花岗斑岩 $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 图解(a)^[10] 和 AFM 图解(b)^[11]

Fig. 3 $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (a) and AFM(b) diagrams of the granite porphyry in the Heicigou gold deposit

Ir—Irvine 分界线,上方为碱性,下方为亚碱性;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—石英岩;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—副长石正长岩;17—副长石深成岩;18—霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩

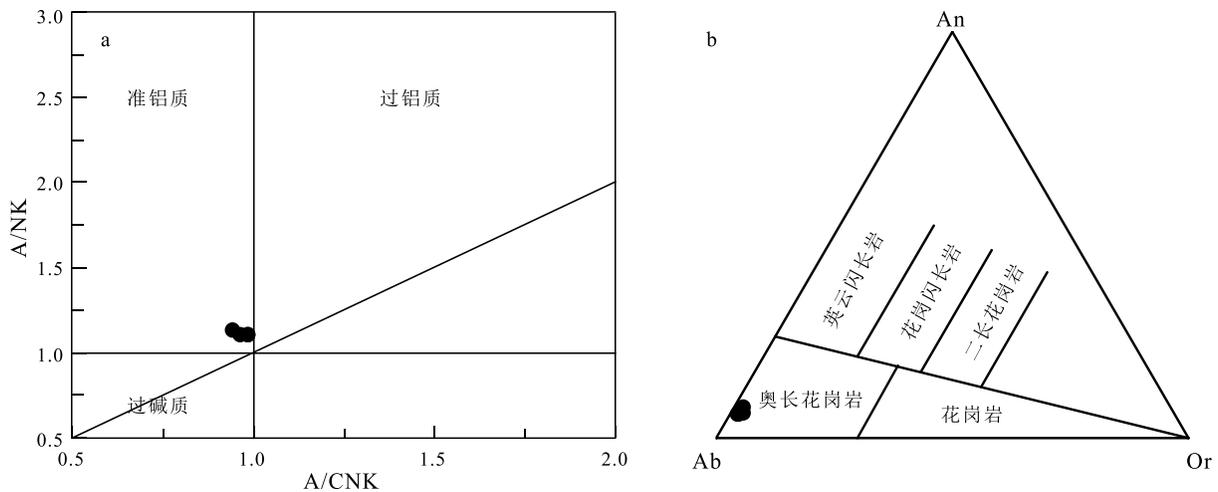


图4 黑刺沟金矿区花岗斑岩 A/CNK-A/NK 图解(a)^[12] 和 An-Or-Ab 图解(b)^[13]

Fig. 4 A/CNK-A/NK (a) and An-Or-Ab (b) diagrams of the granite porphyry in the Heicigou gold deposit

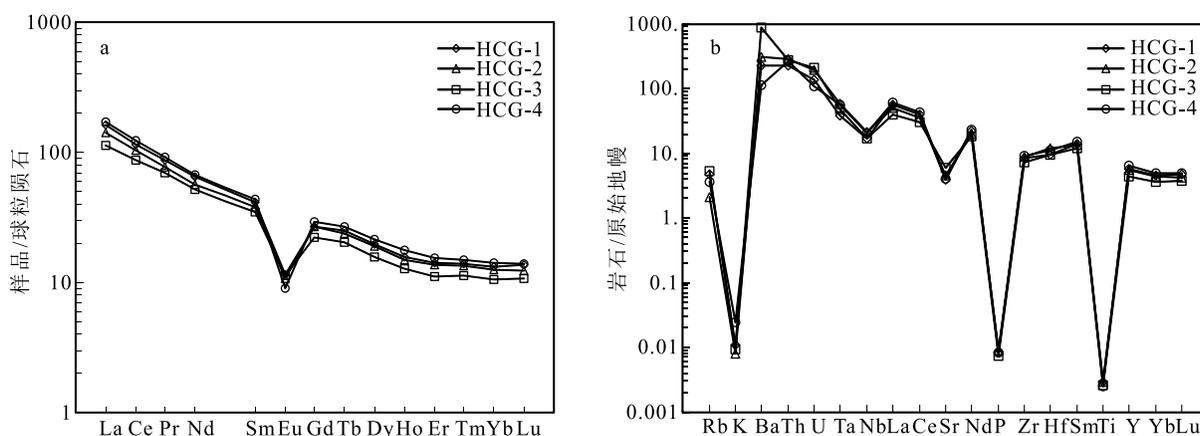


图 5 黑刺沟金矿区花岗斑岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)^[14]

Fig. 5 Chondrite-normalized REE distribution diagram(a) and primitive mantle-normalized trace element spidergram(b) of the granite porphyry in the Heicigou gold deposit

U、Pb、Ce 等高场强元素,亏损 K、P、Ti 等大离子亲石元素。

4.2 锆石 U-Pb 测年

本次对花岗斑岩样品(HCGTC125)中锆石选择了 12 个点进行测试,花岗斑岩锆石 CL 图像(图 6)显示,锆石多呈自形一半自形状晶体,为短柱状或长柱状,棱角较清晰,颗粒长 70~180 μm,宽 60~90 μm,长宽比为 1:1.2~2:1,锆石边界清晰、平直,锆石内部结构多不均一,同一颗锆石不同部位 CL 发光强度不同,反映各晶域具有不同的

U、Th 及 REE 含量,发育明显的岩浆振荡环带,表明其具有岩浆锆石特征^[15]。锆石样品的 U-Pb 分析结果见表 2。由表 2 可见,锆石 U 含量为 $582 \times 10^{-6} \sim 1609 \times 10^{-6}$,Th 含量为 $93 \times 10^{-6} \sim 373 \times 10^{-6}$,Th/U 值为 0.14~0.55,显示岩浆锆石特征^[16]。测得²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄基本一致,为 442.2~449.1 Ma,在谐和曲线上具有较好的一致性(图 7-a),年龄加权平均值为 445.8 ± 2.4 Ma (MSWD=0.36)(图 7-b),代表了黑刺沟金矿区花岗斑岩的结晶年龄。

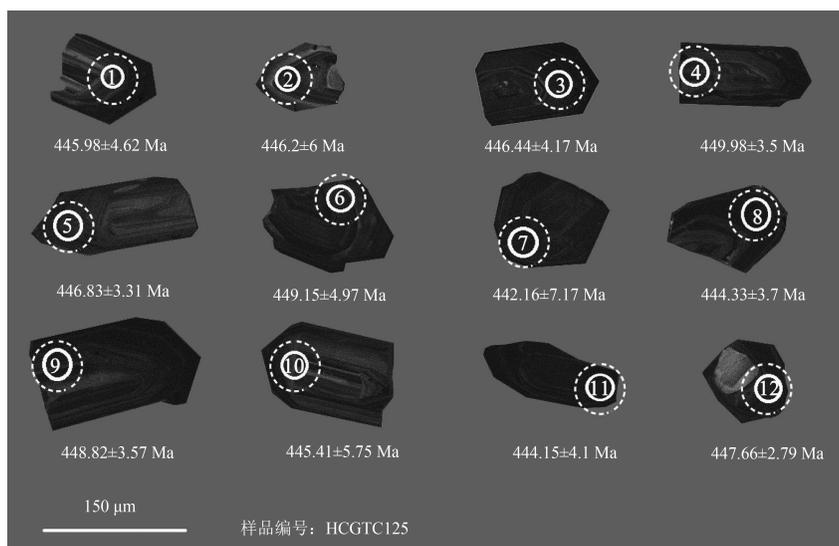


图 6 黑刺沟金矿区花岗斑岩锆石阴极发光(CL)图像

(数字编号代表点号,实线圈为 U-Pb 年龄测点,虚线圈为原位 Hf 同位素测点)

Fig. 6 Zircon CL images of the granite porphyry in the Heicigou gold deposit

表2 黑刺沟金矿区花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotopic dating results of the Heicigou granite porphyry

点号	元素含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值			同位素年龄/Ma		
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
1	260	976	0.27	0.0691 ± 0.001	0.6819 ± 0.0098	0.0716 ± 0.0008	900.5 ± 29.8	527.9 ± 5.9	446 ± 4.6
2	190	704	0.27	0.0565 ± 0.0007	0.5572 ± 0.0074	0.0717 ± 0.001	472 ± 27.1	449.7 ± 4.8	446.2 ± 6
3	313	1057	0.30	0.056 ± 0.0005	0.5555 ± 0.0073	0.0717 ± 0.0007	453.7 ± 19.6	448.6 ± 4.8	446.4 ± 4.2
4	357	649	0.55	0.0662 ± 0.0009	0.6606 ± 0.0094	0.0723 ± 0.0006	813.2 ± 27.6	515 ± 5.7	450 ± 3.5
5	216	913	0.24	0.0563 ± 0.0005	0.5581 ± 0.0054	0.0718 ± 0.0006	463.6 ± 21	450.3 ± 3.5	446.8 ± 3.3
6	184	856	0.21	0.0649 ± 0.0007	0.6449 ± 0.0083	0.0722 ± 0.0008	771.1 ± 23.5	505.4 ± 5.1	449.1 ± 5
7	373	1609	0.23	0.0564 ± 0.0012	0.5526 ± 0.0133	0.071 ± 0.0012	468.7 ± 46.2	446.7 ± 8.7	442.2 ± 7.2
8	320	1593	0.20	0.0568 ± 0.0007	0.5593 ± 0.0063	0.0714 ± 0.0006	484 ± 26.6	451.1 ± 4.1	444.3 ± 3.7
9	120	582	0.21	0.0551 ± 0.0006	0.5486 ± 0.0058	0.0721 ± 0.0006	417.1 ± 25.1	444.1 ± 3.8	448.8 ± 3.6
10	93	650	0.14	0.0576 ± 0.0011	0.5694 ± 0.01	0.0715 ± 0.001	514.4 ± 43	457.6 ± 6.5	445.4 ± 5.7
11	226	1111	0.20	0.0565 ± 0.0007	0.557 ± 0.0094	0.0713 ± 0.0007	472.1 ± 27.3	449.6 ± 6.1	444.1 ± 4.1
12	153	876	0.17	0.0559 ± 0.0007	0.5548 ± 0.0063	0.0719 ± 0.0005	448.2 ± 26.3	448.1 ± 4.1	447.7 ± 2.8

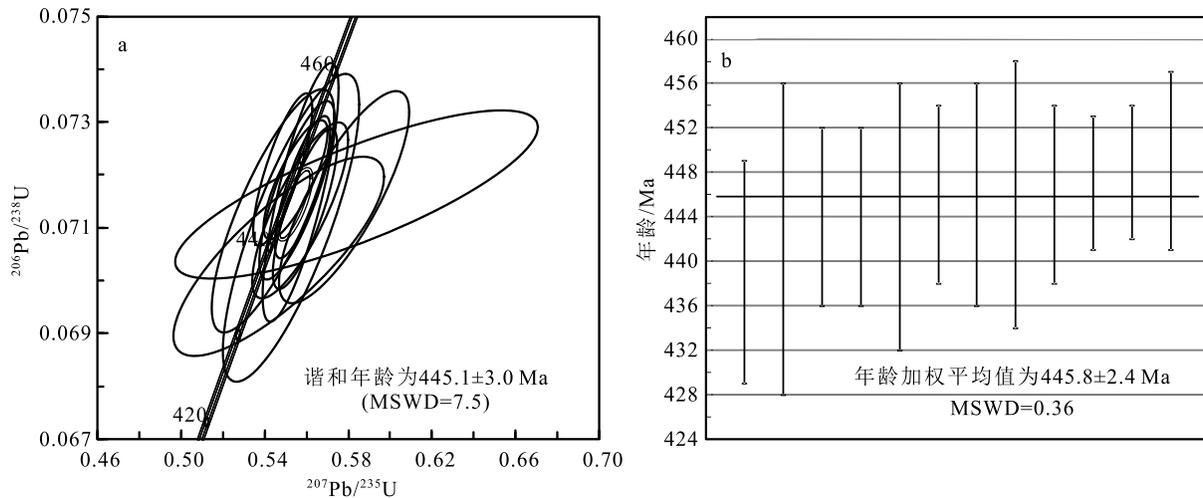


图7 黑刺沟金矿区花岗斑岩锆石 U-Pb 谐和图(a)和年龄加权平均图(b)

Fig. 7 Zircon U-Pb concordia (a) and weighted average age (b) diagrams of the granite porphyry in the Heicigou gold deposit

4.3 Sr-Nd-Pb 同位素组成

黑刺沟金矿区花岗斑岩的 Sr、Nd 同位素组成分析结果见表 3。Pb 同位素组成分析结果见表 4。表 3 数据表明,花岗斑岩的 Sr、Nd 同位素特征相似,都具有高的 Sr 初始值,负的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7133 \sim 0.7158$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i = 0.5118$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -5.15 \sim -4.45$, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值为 $-0.36 \sim -0.32$, 模式年龄 t_{DM} 为 $1696 \sim 1787$ Ma; 根据样品的 U、Th 和 Pb 含量, 进行 Pb 同位素比值的时间校正计算 ($t = 445.8$ Ma), 校

正后的数据与实测值基本一致(表 4), 花岗斑岩 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 18.218 \sim 18.375$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 15.542 \sim 15.562$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 38.220 \sim 38.544$ 。

4.4 锆石 Hf 同位素

对黑刺沟金矿区花岗斑岩锆石进行原位 Hf 同位素分析, Hf 同位素数据见表 5。由表 5 可知, 花岗斑岩 12 个分析点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.000227 \sim 0.001445$, 均小于 0.002, 表明源区有少量的放射性成因 ^{176}Hf 增加, 因此所测 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值代表锆石形成时岩浆体

表 3 黑刺沟金矿区花岗岩斑岩 Sr 和 Nd 同位素组成

Table 3 Sr and Nd isotopic compositions of the granite porphyry in the Heicigou gold deposit

样品号	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	ε _{Nd} (<i>t</i>)	<i>f</i> _{Sm/Nd}	<i>t</i> _{DM} /Ma
HCG-1	0.103	0.7143	0.7136	0.1264	0.5122	0.5118	-5.13	-0.36	1711
HCG-2	0.040	0.7142	0.7140	0.1330	0.5122	0.5118	-4.45	-0.32	1747
HCG-3	0.077	0.7138	0.7133	0.1312	0.5122	0.5118	-5.15	-0.33	1787
HCG-4	0.077	0.7162	0.7158	0.1278	0.5122	0.5118	-4.74	-0.35	1696

注:(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_{CHUR} = 0.7045, (⁸⁷Rb/⁸⁶Sr)_{CHUR} = 0.0827, λ_{Rb} = 0.0142Ga⁻¹, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} = 0.5126, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} = 0.1967, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{DM} = 0.5132, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{DM} = 0.2137, λ_{Sr} = 0.0065Ga⁻¹, *t* = 445.8 Ma, *f*_{Sm/Nd} = (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_s / (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} - 1, *s* (代表样品)

表 4 黑刺沟金矿区花岗岩斑岩 Pb 同位素组成

Table 4 Pb isotopic compositions of the granite porphyry in the Heicigou gold deposit

样品号	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	1σ	<i>t</i> /Ma	(²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i	(²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i	(²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i
HCG-1	18.416	0.0002	15.741	0.0002	38.633	0.0008	445.8	18.375	15.738	38.544
HCG-2	18.371	0.0003	15.723	0.0004	38.551	0.0012	445.8	18.355	15.722	38.522
HCG-3	18.294	0.0021	15.632	0.0026	38.259	0.0085	445.8	18.272	15.630	38.220
HCG-4	18.226	0.0002	15.662	0.0002	38.567	0.0008	445.8	18.218	15.662	38.543

注:(²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb)_i = (²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb)_{实测} - μ(e^{λt} - 1), (²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb)_i = (²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb)_{实测} - μ/137.88(e^{λt} - 1), (²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb)_i = (²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb)_{实测} - ω(e^{λt} - 1), 式中 *t* 为侵位年龄 445.8 Ma, λ²³⁸U = 1.55125 × 10⁻¹⁰/a, λ²³⁵U = 9.8485 × 10⁻¹⁰/a, λ²³²Th = 4.9475 × 10⁻¹¹/a

表 5 黑刺沟金矿区花岗岩斑岩锆石原位 Hf 同位素数据

Table 5 Zircon in situ Hf isotopic data of the granite porphyry in the Heicigou gold deposit

点号	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	<i>t</i> /Ma	ε _{Hf} (<i>t</i>)	<i>T</i> _{DM1} /Ma	<i>T</i> _{DM2} /Ma	<i>f</i> _{Lu/Hf}
1	0.020843	0.000248	0.000708	0.000012	0.282450	0.000020	445.8	-1.8	1124	1538	-0.98
2	0.010521	0.000460	0.000371	0.000017	0.282429	0.000021		-2.4	1142	1577	-0.99
3	0.011578	0.000106	0.000360	0.000004	0.282395	0.000019		-3.6	1189	1654	-0.99
4	0.033064	0.000839	0.001149	0.000025	0.282462	0.000021		-1.4	1121	1521	-0.97
5	0.007096	0.000114	0.000227	0.000004	0.282466	0.000020		-1.0	1088	1493	-0.99
6	0.016727	0.000233	0.000558	0.000007	0.282461	0.000023		-1.3	1103	1509	-0.98
7	0.015343	0.000573	0.000513	0.000022	0.282503	0.000021		0.1	1045	1416	-0.98
8	0.021738	0.000395	0.000655	0.000010	0.282503	0.000017		0.1	1048	1417	-0.98
9	0.022948	0.000830	0.000793	0.000031	0.282420	0.000020		-2.8	1168	1606	-0.98
10	0.015647	0.000335	0.000519	0.000011	0.282490	0.000019		-0.3	1063	1445	-0.98
11	0.044412	0.000721	0.001445	0.000017	0.282462	0.000021		-1.6	1129	1525	-0.96
12	0.013922	0.000546	0.000447	0.000017	0.282183	0.000037		-11.1	1483	2128	-0.99

注:¹⁷⁶Lu 的衰变常数为 1.865 × 10⁻¹¹ a⁻¹; 球粒陨石标准值:(¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{CHUR} = 0.0332 ± 0.0002, (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{CHUR} = 0.282772 ± 0.000029, (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{DM} = 0.0384, (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{DM} = 0.28325; *t*_{DM} = 1/λ × ln { 1 + [(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{sample} - (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{DM}] / [(¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{sample} - (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{DM}] }

系的 Hf 同位素组成^[17], 花岗岩斑岩¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.282183~0.282503, 平均 0.282435; ε_{Hf}(*t*) = -11.1~+0.1, 模式年龄 *T*_{DM2} = 1416~1654 Ma, 远大于其结晶年龄 445.8 ± 2.4 Ma。

5 讨论

5.1 成岩时代

东昆仑黑刺沟金矿区花岗岩斑岩是近年大比例

尺矿产勘查新圈定的岩体, 目前未有测年报道。本次研究表明, 花岗岩斑岩的锆石 U-Pb 年龄为 445.8 ± 2.4 Ma, 表明其结晶成岩年龄为晚奥陶世。区域上, 东昆仑出露的晚奥陶世花岗岩面积较小, 且前人积累的测年数据有限, 祁生胜等^[18]测得没草沟北花岗岩闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 445.9 ± 1.3 Ma, 万宝沟二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 446.82 ± 0.98 Ma; 1:25 万卡巴扭尔多幅测得

红石山二长花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 458.5 ± 1.2 Ma^①; 王泰山测得野牛沟西 65 km 处英云闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 446.9 ± 3.7 Ma (未发表数据); 陈加杰等^[4] 测得东昆仑沟里地区花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 454 ± 2 Ma; 张耀玲等^[19] 测得纳赤台群流纹岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 450.4 ± 4.3 Ma。这些年龄数据表明, 东昆仑在晚奥陶世存在一期岩浆活动, 与本文获得的年龄数据一致, 属同期岩浆活动的产物。

5.2 岩石成因及源区性质

黑刺沟金矿区花岗斑岩具有较高的 SiO_2 (平均

76.9%)、 Al_2O_3 (平均 11.74%) 和 Na_2O 含量 (平均 6.35%), 较低的 MnO 、 MgO 、 CaO 、 P_2O_5 含量, 相对富集 LREE 和 Ba、Th、U、Nb、Ta、Pb, 亏损 HREE 和 K、P、Ti, 铝指数 A/CNK 值介于 0.94~0.98 之间。CIPW 标准矿物计算显示, 未出现堇青石、石榴子石、原生白云母等典型 S 型花岗岩含有的富铝特征性矿物^[20], 在 SiO_2 -Ce 图解 (图 8-a) 和 ACF 图解 (图 8-b) 中, 样品点均落入 I 型花岗岩区域, 样品均具较高的分异指数 (93.74~94.74), 表现出高分异 I 型花岗岩的特征, 在 $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}) - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ 图解 (图 8-c) 中, 样品点主体落入高分异花岗岩区域。综上可以确定, 黑刺沟金矿区花岗

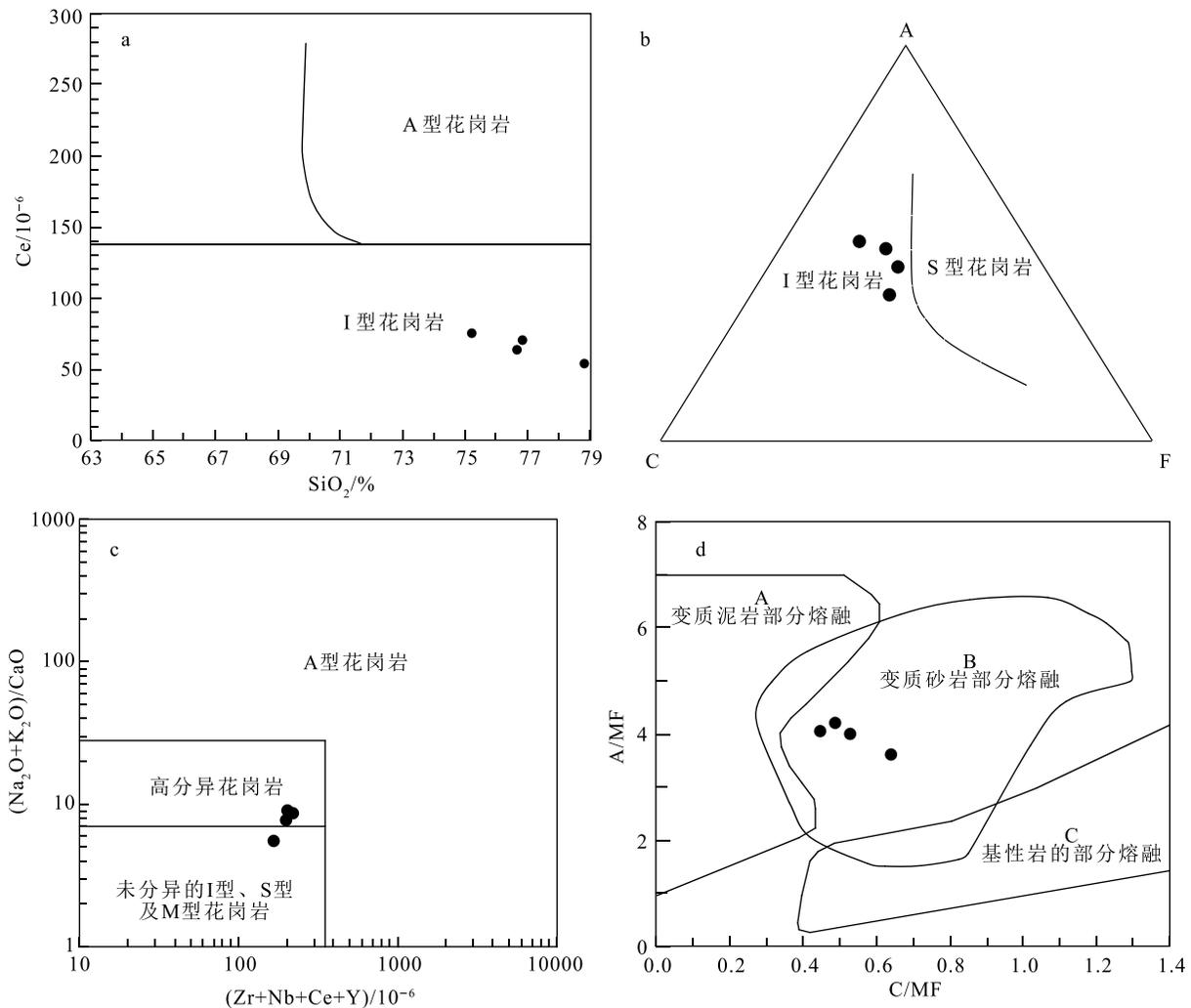


图 8 黑刺沟金矿区花岗斑岩 SiO_2 -Ce 图解 (a)^[21]、ACF 图解 (b)^[21]、 $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}) - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ 图解 (c)^[22] 和 $\text{C}/\text{MF}-\text{A}/\text{MF}$ 图解 (d)^[23]

Fig. 8 SiO_2 -Ce (a), ACF (b), $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}) - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ (c) and $\text{C}/\text{MF}-\text{A}/\text{MF}$ (d) diagrams of the granite porphyry in the Heicigou gold deposit

斑岩为高分异的 I 型花岗岩。

前人研究认为,钙碱性 I 型花岗岩类主要有以下 3 种成因模式^[24]:下地壳变质基性岩石的部分熔融^[25];幔源玄武质岩浆强烈的分离结晶作用^[26];受幔源岩浆改造的沉积物的重熔^[27]。黑刺沟金矿区花岗岩斑岩 SiO₂ 含量介于 75.17%~78.945% 之间, Al₂O₃ 介于 10.22%~12.8% 之间, MgO 介于 0.08%~0.25% 之间, Sr 含量介于 83.85×10⁻⁶~125.8×10⁻⁶ 之间, 均小于 400×10⁻⁶, Yb 含量介于 1.81×10⁻⁶~2.41×10⁻⁶ 之间, Y 含量介于 20.22×10⁻⁶~29.3×10⁻⁶ 之间, δEu=0.25~0.41, (La/Yb)_N=10.68~12.41, 轻稀土元素较重稀土元素富集, Sr/Y 值均较低(2.96~6.22), 不具备埃达克岩特征^[28]。Sr-Nd-Pb 同位素结果显示, Sr 初始值较高, 介于 0.7133~0.7158 之间, ε_{Nd}(t) 具负值(-5.15~-4.45), 较老的一阶段模式年龄 t_{DM}(1696~1787 Ma)。在 C/MF-A/MF 图

解(图 8-d)中,样品点落于变质砂岩部分熔融区域, 在 t-¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 图解(图 9-a)和 t-ε_{Hf}(t) 图解(图 9-b)中,样品点均落于下地壳附近。在铅同位素源区图解(图 9-c,d)中,样品点均落入成熟弧,并靠近下地壳,反映花岗质岩浆源区应为古老的下地壳。黑刺沟花岗岩斑岩锆石 12 个点的 ε_{Hf}(t) 中除 2 个点为正值外,其余均为负值(-11.1~+0.1)。花岗质岩石负 ε_{Hf}(t) 值通常代表古老地壳成因^[17], 锆石 Hf 同位素的二阶段模式年龄(T_{DM2})为 1416~1654 Ma, 远大于花岗岩斑岩锆石结晶年龄(445.8 Ma), 说明岩浆源区来自古—中元古代下地壳。

5.4 成矿构造背景

前人对东昆仑岩浆活动-构造事件研究已取得了一批重要成果,特别是针对早古生代岩浆活动进行了大量研究,认为东昆仑在早古生代经历了完整的原特提斯洋洋壳形成及扩张、俯冲消减、碰撞—

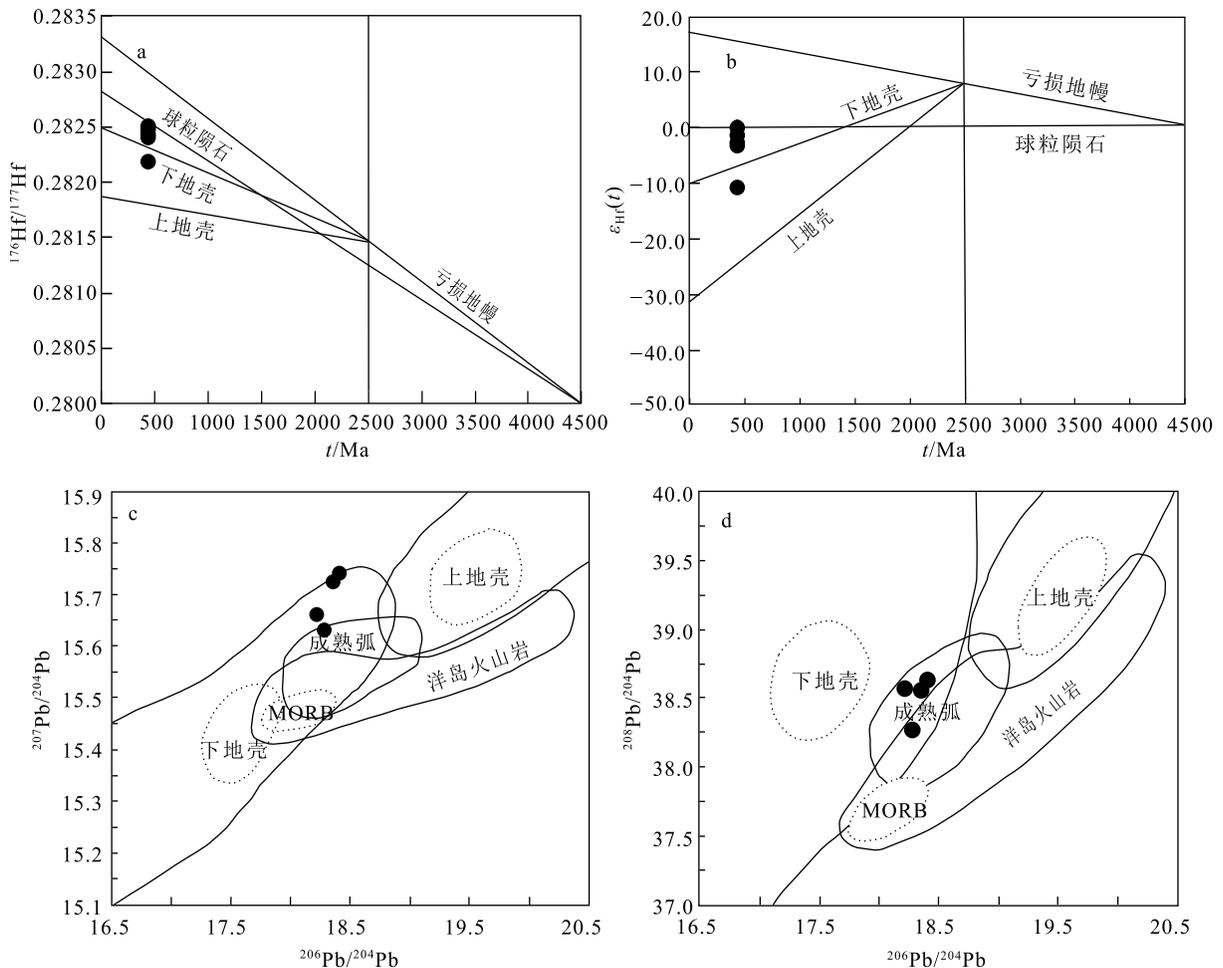


图 9 黑刺沟金矿区花岗岩斑岩 t-¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf(a)、t-ε_{Hf}(t)图解(b)^[17]和 Pb 同位素源区图(c,d)^[29]

Fig. 9 t-¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf(a), t-ε_{Hf}(t)(b) and Pb isotopic (c,d) diagrams of the granite porphyry in the Heicigou gold deposit

后碰撞造山等演化过程^[3]。没草沟北花岗闪长岩年龄为 445.9 ± 1.3 Ma^[18]、万宝沟二长花岗岩年龄为 446.82 ± 0.98 Ma^[18]，结合地球化学研究，认为其为活动大陆边缘弧环境的靠近大陆一侧的 TTG 花岗岩组合；祁漫塔格西北部阿确墩地区石英闪长岩年龄为 448.8 ± 3.9 Ma^[30]，地球化学研究表明，其形成于俯冲消减环境。以上研究表明，东昆仑在 445~480 Ma 之间处于俯冲消减环境。本次测得东昆仑黑刺沟金矿区花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 445.8 ± 2.4 Ma。元素地球化学特征表明，黑刺沟金矿区花岗斑岩属于准铝质钙碱性岩浆系列 I 型高分异花岗岩，在 $(Yb+Ta)-Rb$ 图解(图 10-a)和 $(Y+Nb)-Rb$ 图解(图 10-b)中，样品点均落入火山弧花岗岩区域。从 Pb 同位素源区图(图 9-c、d)也可以看出，黑刺沟金矿区花岗斑岩形成于成熟弧环境，与区域上前人研究结果^[4]基本一致。综上，笔者认为黑刺沟花岗斑岩形成于原特提斯洋向北俯冲消减环境下的陆缘弧环境。

此外，微量元素分析显示，花岗斑岩 Au、Cu、Pb 元素具有较高的丰度值，其中 Au 丰度值为 $256 \times 10^{-9} \sim 458 \times 10^{-9}$ ，Cu 为 $20.33 \times 10^{-6} \sim 662 \times 10^{-6}$ ，Pb 为 $318.3 \times 10^{-6} \sim 1328 \times 10^{-6}$ ，可能是后期矿化蚀变引起，但也不排除花岗斑岩本身存在原始高丰度的可能，进一步工作中应引起重视，加强与花岗斑岩接触的破碎蚀变带的研究可能会取得找矿新发现。

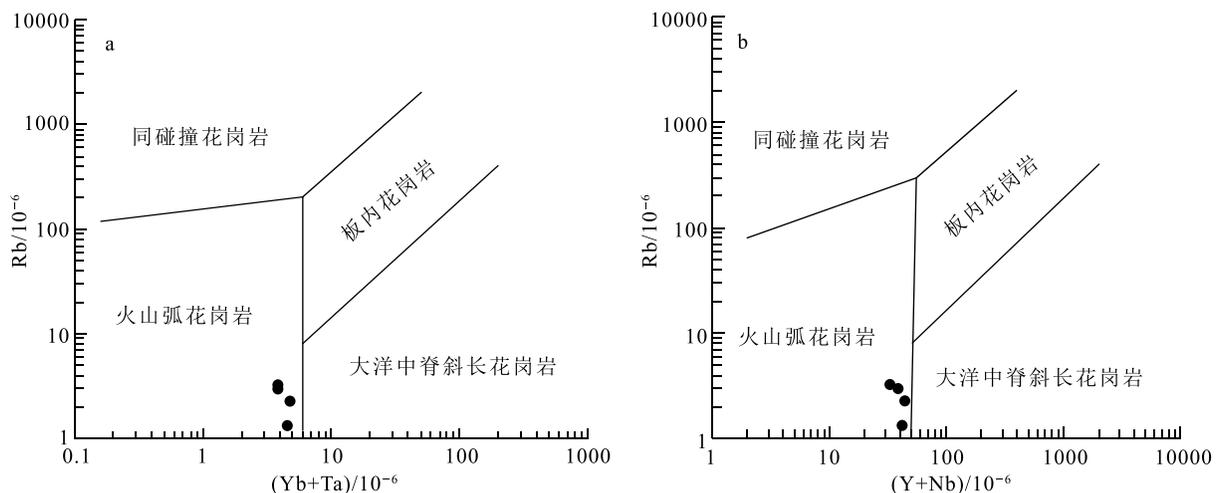


图 10 黑刺沟金矿区花岗斑岩 $(Yb+Ta)-Rb$ (a)和 $(Y+Nb)-Rb$ (b)构造环境判别图解(底图据参考文献[31])

Fig. 10 $(Yb+Ta)-Rb$ (a), and $(Y+Nb)-Rb$ (b) tectonic setting discrimination diagrams for the granite porphyry in the Heicigou gold deposit

6 结论

(1)黑刺沟金矿区花岗斑岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 445.8 ± 2.4 Ma (MSWD = 0.36)，说明花岗斑岩形成于晚奥陶世。

(2)岩石地球化学特征表明，花岗斑岩具较高的 SiO_2 (平均 76.9%)、 Al_2O_3 (平均 11.74%) 和 Na_2O (平均 6.35%) 含量，较低的 MnO、MgO、CaO、 P_2O_5 含量，相对富集 LREE 和 Ba、Th、U、Pb、Nb、Ta、Zr、Hf，亏损 HREE 和 K、P、Ti，铝饱和指数 A/CNK 值介于 0.94~0.98 之间，分异指数为 93.74~94.74，属于准铝质钙碱性岩浆系列 I 型高分异花岗岩。

(3)黑刺沟花岗斑岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 $-5.15 \sim -4.45$ ， $\epsilon_{Hf}(t)$ 介于 $-11.1 \sim +0.1$ 之间， T_{DM2} 介于 1416~1654 Ma 之间。结合区域资料，认为黑刺沟花岗斑岩形成于原特提斯洋向北俯冲消减的陆缘弧环境，为古一中元古代下地壳物质熔融的产物。

致谢:审稿专家对论文进行了详细审阅并提出了宝贵意见，在此表示感谢。

参考文献

- [1] 潘彤,王秉璋,李东生,等.青海东昆仑成矿环境成矿规律与找矿方向[M].北京:地质出版社,2016.
- [2] 李瑞保,裴先治,李佐臣,等.东昆仑南缘布青山构造混杂带带力斯坦南 MOR 型玄武岩地质、地球化学特征及岩石成因[J].地球科学,2015,40(7): 1148-1162.

- [3] 莫宣学,罗照华,邓晋福,等.东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J].高校地质学报,2007,13(3): 403-414.
- [4] 陈加杰,付乐兵,魏俊浩,等.东昆仑沟里地区晚奥陶世花岗岩长岩地球化学特征及其对原特提斯洋演化的制约[J].地球科学,2016,41(11): 1863-1882.
- [5] 陈邦学,徐胜利,杨有生,等.东昆仑西段其木来克一带晚二叠世侵入岩的成因及其构造意义[J].地质通报,2019,38(6): 1040-1051.
- [6] 高晓峰,校培喜,谢从瑞,等.东昆仑阿牙克库木湖北巴什尔希花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J].地质通报,2010,29(7): 1001-1008.
- [7] 刘彬.东昆仑跃进山早泥盆世侵入杂岩体岩石学、锆石 U-Pb 年代学及岩石成因[D].中国地质大学硕士学位论文,2011.
- [8] 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.
- [9] Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003: 1-20.
- [10] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. Earth Science Reviews, 1994, 37(3/4): 215-224.
- [11] Irvine T N, Barager W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1971, 8: 523-548.
- [12] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635-643.
- [13] O'Connor J A. Classification for quartz-rich igneous rock based on feldspar ratios [J]. US Geol Surv Prof Paper, 1965, 525: B79-B84.
- [14] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]// Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publication, 1989, 42(1): 313-345.
- [15] 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): 1589-1604.
- [16] Slama J, Kosler J, Condon D J, et al. Plesovice zircon - A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis [J]. Chemical Geology, 2008: 1-35.
- [17] 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.
- [18] 祁生胜. 青海省东昆仑造山带火成岩岩石构造组合与构造演化[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2015.
- [19] 张耀玲,张绪教,胡道功,等. 东昆仑造山带纳赤台群流纹岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质力学学报, 2010, 16(1): 21-27.
- [20] 李献华,李武显,李正祥,等. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义[J]. 科学通报, 2007, 52(9): 981-991.
- [21] Collins W, Beams S, White A, et al. Nature and Origin of A-type Granites with Particular Reference to Southeastern Australia [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1982, 80(2): 189-200.
- [22] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95: 407-419.
- [23] Alther R, Holl A, Hegner E, et al. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany) [J]. Lithos, 2000, 50(1): 51-73.
- [24] 彭勃,李宝龙,秦广洲,等. 西藏拉萨地块盐湖石英闪长岩成因: 锆石 SHRIMP U-Pb 年代学、地球化学及 Sr-Nb-Pb-Hf 同位素的制约[J]. 地质学报, 2019, 93(3): 606-621.
- [25] Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite types [J]. Pacific Geology, 1974, 8: 173-174.
- [26] Beard J S, Lofgren G E. Dehydration melting and water saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3 and 6.9 kb [J]. Journal of Petrology, 1991, 32: 365-401.
- [27] Clemens J D. Stype granitic magmas petrogenetic issues, models and evidence [J]. Earth Science Reviews, 2003, 61(1/2): 1-18.
- [28] 张旗,王元龙,张福勤,等. 埃达克岩与斑岩铜矿 [J]. 华南地质与矿产, 2002, 3: 85-90.
- [29] 孙立新,任邦方,赵凤清,等. 内蒙古锡林浩特地块中元古代花岗岩片麻岩的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征 [J]. 地质通报, 2013, 32(2/3): 327-340.
- [30] 李婷,李猛,胡朝斌,等. 东昆仑祁漫塔格阿确墩地区侵入岩 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义 [J]. 地球科学, 2018, 43(12): 4350-4363.
- [31] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. Journal of Petrology, 1984, 25: 956-983.
- ①王秉璋,王瑾,叶占福,等. 布喀达坂峰幅(J46C004001)1: 25 万区域地质调查. 2004.