

东昆仑迈龙金矿区花岗质岩浆岩锆石 U-Pb 定年和地球化学特征及其地质意义

于小亮^{1,2,3}, 李华³, 魏小林³, 张晖青³, 李杰³, 谷超³, 童海奎³,
陈华勇⁴, 肖兵^{4*}, 汪浩⁴, 张斌顺⁵

1. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 青海省地质调查局, 自然资源部高原荒漠区战略性矿产勘查开发技术创新中心, 青海 西宁 810001
4. 中国科学院, 广州地球化学研究所, 矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640
5. 青海省有色第三地质勘查院, 青海 西宁 810000

摘要: 为了揭示东昆仑造山带原特提斯洋和古特提斯洋的构造演化过程及其与金矿成矿的成因联系, 本文对迈龙金矿区的二长花岗岩和花岗闪长岩开展了岩相学、地球化学和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究。结果表明, 二长花岗岩和花岗闪长岩的结晶年龄分别为 421 ± 11 Ma (晚志留世) 和 228 ± 4 Ma (晚三叠世), 具有准铝质、高钾钙碱性系列特征, 富集轻稀土 (LREE), 大离子亲石元素 (LILE: Rb, K) 和地球化学性质活泼的不相容元素 (U, Th, Pb), 亏损高场强元素 (HFSE: Nb, Ta, P, Ti), 显示岛弧花岗岩的地球化学特征。结合区域地质背景, 认为二者形成于造山后伸展阶段的壳幔相互作用, 迈龙金矿的矿化与古特提斯造山后伸展阶段的构造-岩浆作用密切相关。该研究为区域构造演化和金矿成矿背景提供了重要依据, 对矿产勘探具有指导意义。

关键词: 东昆仑造山带; U-Pb 定年; 地球化学; 二长花岗岩; 花岗闪长岩

中图分类号: P581

收稿日期: 2024-05-22

Zircon U-Pb Age and Geochemical Characteristics of Granitic Magmatic Rocks in the Mailong Gold Deposit, East Kunlun, and Their Geological Significance

YU Xiaoliang^{1,2,3}, LI Hua³, WEI Xiaolin³, ZHANG Huiqing³, LI Jie³, GU Chao³, TONG Haikui³,
CHEN Huayong⁴, XIAO Bing^{4*}, WANG Hao⁴, ZHANG Binshun⁵

(1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Qinghai Provincial Geological Survey Bureau, Technology Innovation Center for Exploration and Exploitation of Strategic Mineral Resources in Plateau Desert Region, Ministry of Natural Resources, Xining, Qinghai 810001, China; 4. CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 5. Qinghai Province The Third Geological Exploration Institute of Nonferrous Metals, Xining

基金项目: 青海省地质勘查基金“青海省重要矿集区深部找矿突破示范”项目 (NO. 2023085029ky004) 和“青海省柴周缘主要矿集区矿产资源深部勘查方法技术示范研究”项目 (NO. 2021074008ky008); 2023 年度青海省“昆仑英才·高端创新创业人才”项目及广州市科技计划项目 (青年博士“启航”项目) (NO. 2024A04J4749)。

第一作者简介: 于小亮 (1988-), 女, 博士研究生, 主要从事地质找矿勘查, 矿床学和地球化学研究。ORCID: 0009-0008-0203-9159. E-mail: xiaoliangyu1988@foxmail.com.

***通讯作者:** 肖兵, E-mail: xiaobing@gig.ac.cn.

810000, Qinghai, China;)

Abstract: To reveal the tectonic evolution of the Proto-Tethys and Paleo-Tethys Oceans and their genetic links to gold-polymetallic mineralization in the East Kunlun Orogenic Belt (EKOB), this study conducted petrographic, geochemical, and LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronological analyses on monzogranite and granodiorite from the Mailong gold deposit. The results show that the monzogranite and granodiorite crystallized at 421 ± 11 Ma (Late Silurian) and 228 ± 4 Ma (Late Triassic), respectively, exhibiting metaluminous, high-potassium calc-alkaline characteristics. Trace element analyses reveal enrichment in light rare earth elements (LREE), large-ion lithophile elements (LILE: Rb, K), and incompatible elements (U, Th, Pb), with depletion in high-field-strength elements (HFSE: Nb, Ta, P, Ti) and weak negative Eu anomalies, indicating an island arc granite affinity. Combined with regional geological evidence, these rocks formed through crust-mantle interaction during the post-orogenic extensional stage. The Mailong gold deposit, primarily hosted in the granodiorite, is likely associated with tectonic-magmatic activities during the post-orogenic extension of the Paleo-Tethys evolution. This study provides critical age constraints and geochemical insights into the tectonic evolution and gold mineralization in the EKOB, offering valuable guidance for regional mineral exploration.

Key words: East Kunlun orogenic belt; U-Pb dating; Geochemistry; Monzogranite; Granodiorite.

东昆仑造山带地处青藏高原东北缘, 夹持于柴达木盆地与巴颜喀拉地体之间, 是我国中央造山带的重要组成部分(丰成友等, 2004; 张德全等, 2005; 许志琴等, 2006), 其经历了原特提斯洋和古特提斯洋构造演化, 广泛发育与这两期构造活动相关中酸性岩浆岩(Xiong et al., 2012; Zhang et al., 2012; Huang et al., 2014), 是研究这两期造山作用的天然实验室(许志琴等, 2006; 莫宣学等, 2007)。此外, 由于这两期构造-岩浆活动的影响, 在东昆仑造山带形成了多个大中小型金矿床, 如: 果洛龙洼金矿床 ($>40t$, $409.06 \pm 1.42Ma$, 陈加杰, 2018)、五龙沟金矿田 ($>128t$, $236.5 \pm 0.5Ma$, 张德全等, 2005)、大场金矿田 ($>190t$, $218.6 \pm 3.2Ma$, 张德全等, 2005; Zhai et al., 2021)、接纳格金矿床 ($>8t$, $349 \sim 383Ma$, Chen et al., 2020)、开荒北金矿床 ($4.71t$, 印支期, 丰成友等, 2004)、东大滩锑金矿床 ($3.89t$, 印支期, 丰成友等, 2004)等, 使得东昆仑造山带成为中国重要金矿产资源基地之一。前人研究表明, 这些岩浆活动与原特提斯洋和古特提斯洋的俯冲、碰撞和后碰撞的伸展引起的壳幔相互作用有关(张亚峰等, 2010; 刘战庆等, 2011; Xiong et al., 2012; Zhang et al., 2012; 陈有炘等, 2013; 高永宝, 2013; Huang et al., 2014; Li et al., 2015; 陈加杰, 2018; 李斌等, 2024; 马忠元等, 2024)。然而, 这些研究对于原特提斯洋和古特提斯洋俯冲、碰撞以及碰撞后的伸展具体的时限认识还不统一(莫宣学等, 2007; Huang et al., 2014; Li et al., 2015), 从而制约了对东昆仑原特提斯和古特提斯造山活动演化过程

的认识。此外,东昆仑造山带金矿床与这两期造山活动形成的中酸性岩浆岩密切相关,有些甚至产于这些岩浆岩中(如沟里矿集区迈龙金矿床),因而对这些岩浆开展研究也可以为该区域的金矿形成构造背景提供依据。

沟里矿集区是东昆仑造山带重要的金矿田之一,区内产出多个大中型金矿床,如果洛龙洼金矿床(>40t)、迈龙金矿床(>10t)、接纳格金矿床(>8t)、阿斯哈金矿床(>6t)、瓦勒尕金矿床(>12t)、德龙金矿床(>5t)等,目前已经探明的金资源量已超过110t(Chen et al., 2020)。野外地质证据表明,这些金矿床与沟里矿集区广泛发育的花岗质岩浆岩活动密切相关。迈龙金矿床是近些年东昆仑造山带金矿勘查的重要发现之一,但是目前对于迈龙金矿床相关的岩浆活动还缺乏岩石成因与成岩时代的制约,也制约了对于迈龙金矿床的认识。为此,本文以东昆仑造山带东段迈龙金矿矿区广泛发育的二长花岗岩和花岗闪长岩为研究对象,开展岩石地球化学、锆石微量元素以及LA-ICP-MS同位素年代学研究,探讨它们的岩石成因和构造动力学背景,以期为东昆仑原特提斯洋和古特提斯洋的演化提供年龄约束,也为东昆仑造山带金矿的形成背景提供支撑。

1 地质背景及岩相学特征

东昆仑造山带呈近东西向展布于青海省中部,是我国中央造山带重要组成部分,其北以昆北断裂为界与柴达木地块分开,南部以昆南断裂为界与巴颜喀拉地体相邻,西端被阿尔金大型走滑断裂所截,东端以苦海-赛什塘断裂为界与西秦岭造山带相连(图1a),是我国金矿的重要集中地之一(丰成友等, 2004; 张德全等, 2005; Zhai et al., 2021; Chen et al., 2020)。该造山带位于原特提斯构造域与古特提斯域叠接复合部位,为一个典型的复合造山带,经历了至少四次构造-岩浆旋回,其中以早古生代原特提斯洋演化和晚古生代-中生代古特提斯洋演化所引起的构造-岩浆活动最为显著(莫宣学等, 2007)。区域上,东昆仑造山带被昆中断裂带划分为东昆北和东昆南两个地体,昆北地体的基底为古元古界金水口岩群,上覆盖层主要为中元古界万保沟群、寒武-奥陶系纳赤台群和三叠系鄂拉山组;昆南地体的基底主要为中元古界小庙组,并被大面积的古生界和中生界地层所覆盖。由于处于板块交接部位,区域断裂构造错综复杂,主要发育有近东西向的昆北、昆中和昆南断裂构造带。岩浆岩在东昆仑造山带也非常发育,大致可分为两期(460~410Ma和260~210Ma),且主要分布于昆北地体中,是原特提斯和古特提斯演化共同的产物(张亚峰等, 2010; 刘战庆等, 2011; Xiong et al., 2012; 陈有炘等, 2013; Huang et al., 2014; Li et al., 2015; 陈加杰, 2018; 马忠元等, 2024)。

研究区所处的沟里矿集区位于东昆仑造山带东段，地跨东昆北和东昆南地体。因区域断裂构造和岩浆活动强烈，呈多期次性叠加，该区地层出露杂乱，且连续性和完整性较差，多呈断块状。古元古界金水口群、中元古界长城系小庙岩组和中-新元古界万宝沟群共同组成了区内的基底岩系，其中，金水口群分布范围较广，岩性有片麻岩、片岩和斜长角闪岩，局部可见变粒岩和大理岩，该套地层中发现多处金、银多金属矿床（点），如接纳格金矿床，那更康切尔沟银矿等；小庙岩组岩性主要分布有片岩、片麻岩和大理岩；万宝沟群主要为片岩和大理岩，地层片理化发育，该套地层是铜、钴矿的赋矿地层之一，已发现督冷沟铜钴矿、圆以金矿点等多处矿床（点）。此外，还有发育少量奥陶系纳赤台蛇绿混杂岩，三叠系鄂拉山组火山岩，第四系等。区内断裂构造十分发育，以压性或压扭性断裂为主，具多期活动的特点，主要断裂为近东西向展布的昆中断裂及其北西向的德龙-香日德次级断裂和坑得弄舍-哈日扎次级断裂，该组断裂构造控制了区内的地层、岩浆岩和矿床（点）分布，此外，还发育一系列北西向、北北东向、北北西向和近东西向的次级断裂，这些次级断裂是区内的控矿构造，控制着矿体走向及矿产的分布。区内岩浆活动十分强烈，且持续时间长，始于元古代止于中生代，其中以印支期和华力西期岩浆活动最为频繁，遍布全区，岩浆岩类型繁多，种类复杂，发育超基性、基性、中酸性和酸性侵入岩（图1b）。

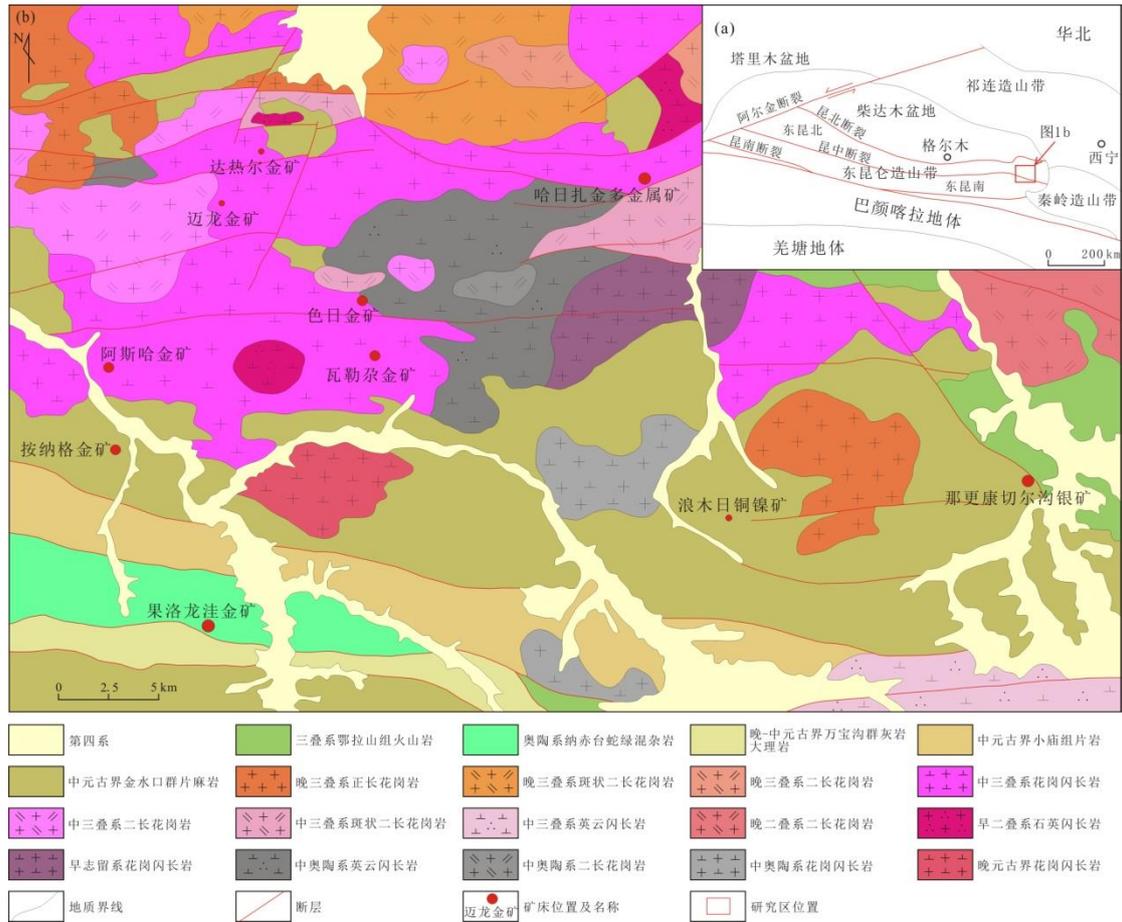


图 1 沟里地区地质简图（据陈加杰等，2018 修改）

Fig.1 Geological sketch Map of the GouLi area (after Chen et al., 2018)

迈龙二长花岗岩和花岗闪长岩位于东昆北地体中，两者均侵位于元古古代金水口群片麻岩中（图2），并在其中圈出多条含矿（化）构造破碎蚀变带。

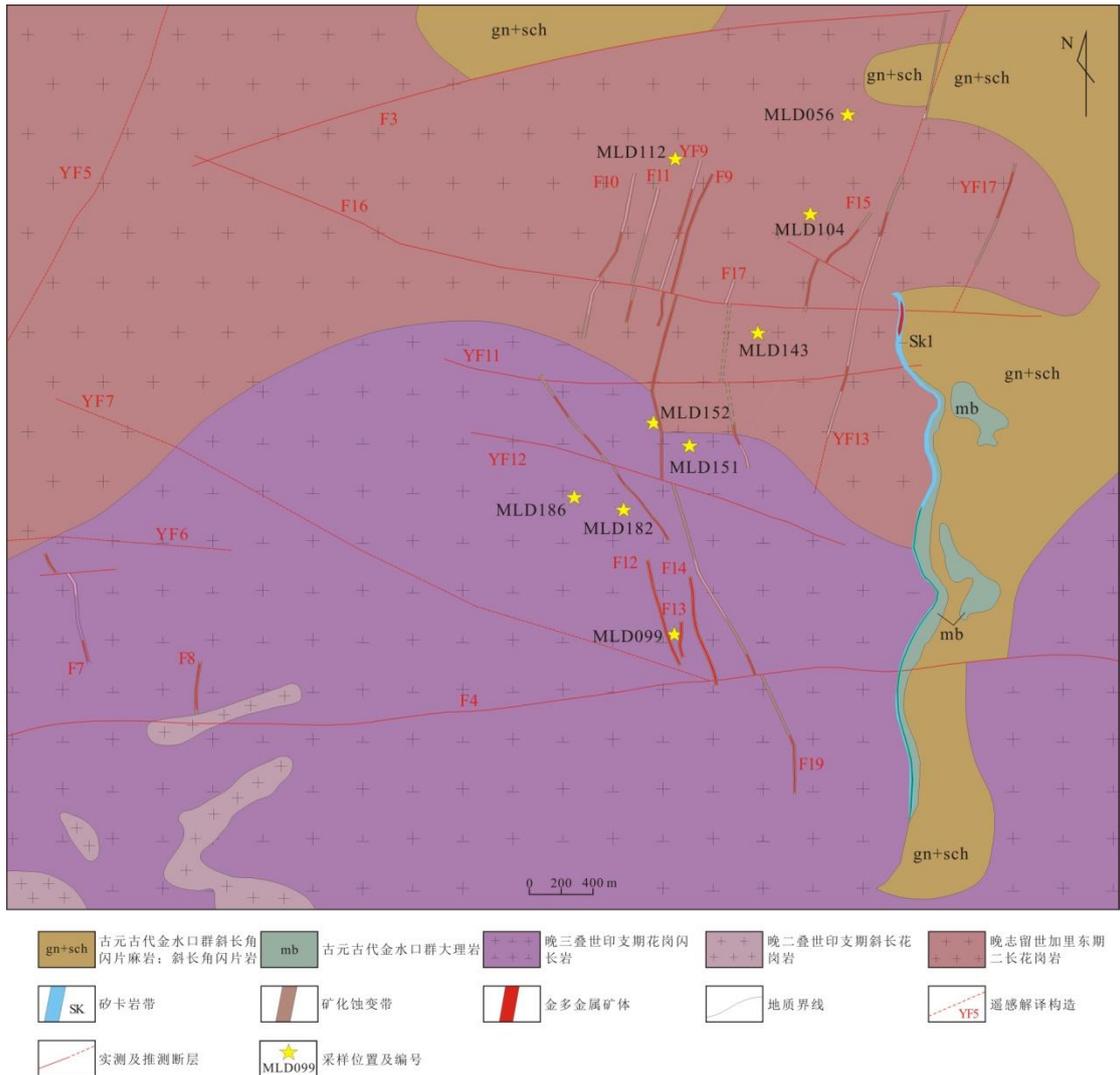


图2 迈龙金矿区地质简图 (据沈志远等, 2022修改)

Fig.2 Geological sketch Map of the Mailong gold deposit (after Shen et al., 2022)

二长花岗岩在矿区分布广泛, 特别集中在矿区北段, 多侵入到金水口群老基底岩石中(图3a)。岩石呈灰白色-浅肉红色, 半自形粒状结构, 块状构造。显微镜观察表明二长花岗岩主要由斜长石(35%~40%)、钾长石(25%~30%)、石英(20%~25%)、黑云母(5%~7%)以及少量磁铁矿、磷灰石等副矿物组成(图3c、e)。

花岗闪长岩为一套富含黑云母的中粗粒花岗闪长质岩石(图3b), 岩石主要由斜长石(45%~50%)、石英(15%~20%)、钾长石(20%~25%)、黑云母(5%~7%)、角闪石(3%)以及磷灰石、榍石、磁铁矿等副矿物组成(图3d、f), 主要分布在矿区南段, 部分侵入到金水口群老基底岩石中, 局部可见与晚志留世二长花岗岩成侵入接触关系, 并且部分花岗闪长岩产生明显的硅化蚀变现象, 指示其形成晚于二长花岗岩。

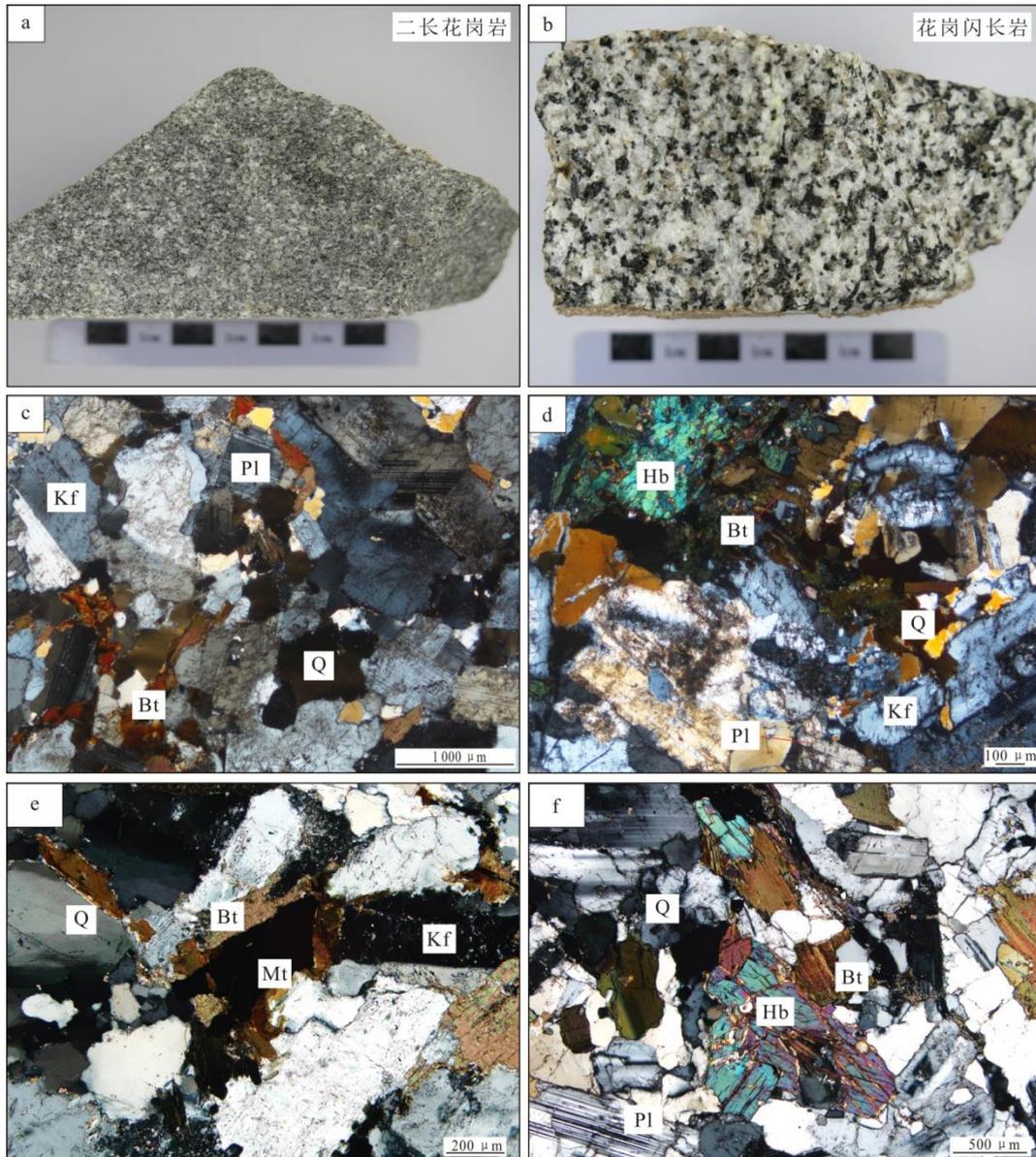


图3 迈龙金矿区岩体手标本和显微照片

Fig.3 The hand specimens and microscopic characteristics of the granitic intrusions in the Mailong gold deposit

a, c, e 为二长花岗岩手标本及镜下特征; b, d, f 为花岗闪长岩手标本及镜下特征; 矿物缩写: Qz. 石英; Pl. 斜长石; Kf. 钾长石; Bt. 黑云母; Hb. 角闪石; Mt. 磁铁矿;

2 分析方法

本次研究采集迈龙矿区二长花岗岩和花岗闪长岩共9件新鲜岩石样品, 开展岩石地球化学分析和锆石U-Pb定年。岩石薄片磨制与鉴定、样品全岩元素分析、样品锆石U-Pb LA-ICP-MS定年均在中国科学院广州地球化学研究所完成。薄片鉴定与照相在实验室尼康ECLIPSE LV100POL偏光显微镜下完成。全岩主量元素在实验室Rigaku RIX 2000型X射线荧光光谱仪(XRF)中完成, 分析精度优于5%。微量元素包括稀土元素使用仪器PE-Elan 6000型ICP-MS测试, 元素误差小于5%。主、微量元素及稀土元素(表1)的分析流程参照文献(Li

et al., 2005)。

样品锆石 U-Pb LA-ICP-MS 定年, 实验室采用 New Wave Research 193nm ArF 准分子激光剥蚀系统, 与 Thermo Scientific iCap-RQ 四极杆型电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 联用。准分子激光发生器产生的深紫外光束经匀化光路聚焦于锆石表面, 激光束斑直径为 30 μm , 频率为 6Hz, 能量密度为 3.5J/cm²。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度。测试过程中以标准锆石 91500 为外标, 校正仪器质量歧视与元素分馏; 以 NIST SRM 610 为外标, 以 Si 为内标元素标定锆石中的 Pb 元素含量, 以 Zr 为内标元素标定锆石中其余微量元素含量; 以标准锆石 Plešovice 和 Tan-Z 为监控样, 用以评估 U-Pb 定年数据质量, 实验流程见文献 (Li et al., 2012)。测得原始测试数据利用 iolite4 软件进行离线处理 (包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Pb 同位素比值和年龄计算), 使用 Isoplot Ex 3.0 进行年龄计算和协和图绘制。

表 1 迈龙二长花岗岩和花岗闪长岩体全岩主量 (%)、微量 ($\times 10^{-6}$) 和稀土元素 ($\times 10^{-6}$) 分析结果

Table 1 Analytic results of the Major (%), trace ($\times 10^{-6}$) and rare earth elements ($\times 10^{-6}$) of the Mailong Monzogranite and Granodiorite

样品编号	MLD056	MLD143	MLD104	MLD112	MLD186	MLD182	MLD099	MLD152	MLD151
代表岩性	二长花岗岩				花岗闪长岩				
主量元素/%									
SiO ₂	69.69	67.93	67.74	72.53	65.52	64.78	61.99	63.82	63.60
TiO ₂	0.48	0.33	0.60	0.23	0.54	0.59	0.68	0.68	0.67
Al ₂ O ₃	14.42	16.80	15.22	14.20	15.50	15.48	16.59	15.28	15.38
Fe ₂ O ₃	3.44	2.47	4.20	1.92	4.10	4.64	5.27	5.05	5.11
MnO	0.05	0.03	0.05	0.02	0.06	0.07	0.08	0.08	0.08
MgO	0.89	1.23	1.20	0.43	2.02	2.31	2.44	2.67	2.57
CaO	2.24	3.44	2.96	1.65	4.08	4.36	4.90	4.46	4.43
Na ₂ O	2.94	4.90	3.11	3.01	3.40	3.37	3.66	3.29	3.33
K ₂ O	4.16	1.64	3.48	4.96	2.83	2.88	2.52	3.11	3.00
P ₂ O ₅	0.14	0.09	0.21	0.05	0.13	0.15	0.17	0.12	0.12
LOI	0.91	0.79	0.75	0.75	0.89	0.67	0.75	0.91	0.97
A/CNK	1.08	1.04	1.07	1.07	0.96	0.93	0.94	0.90	0.92
A/NK	1.50	1.70	1.70	1.40	1.80	1.80	1.90	1.70	1.80
Mg [#]	34	50	36	31	49	50	48	51	50
Na ₂ O+K ₂ O	7.10	6.54	6.59	7.97	6.23	6.25	6.18	6.40	6.33
微量元素/ $\times 10^{-6}$									
Rb	147.0	93.4	132.0	163.5	104.5	110.5	98.1	111.5	125.5
Ba	1300	100	1300	1300	600	700	700	700	600
Th	24.00	8.17	33.00	23.50	23.00	22.50	12.55	15.85	16.75
U	2.55	1.24	2.05	4.74	1.80	1.95	1.46	2.03	2.10
Nb	17.8	6.1	16.4	10.5	9.5	10.8	11.8	12.6	13.1

Ta	0.88	0.47	0.60	0.73	0.82	0.77	0.77	0.80	0.84
La	65.1	22.0	80.8	61.6	60.8	60.8	36.0	36.1	38.6
Ce	127.0	45.3	153.5	108.5	108.0	112.5	73.5	71.5	78.1
Pr	13.45	5.25	15.75	10.90	10.35	11.05	8.21	8.10	8.90
Sr	320	462	456	297	485	481	563	375	408
Nd	46.5	19.4	52.0	34.5	32.7	36.4	29.6	29.8	32.1
Sm	7.54	3.39	7.92	5.03	4.35	5.46	5.16	5.42	5.67
Zr	364	142	359	191	161	168	242	243	425
Hf	8.8	3.6	8.4	5.1	4.5	4.8	6.1	6.4	10.7
Eu	1.44	0.86	1.38	0.76	0.92	1.07	1.18	1.14	1.14
Gd	5.71	2.50	5.40	3.42	3.00	3.90	4.17	4.64	4.53
Tb	0.84	0.36	0.76	0.49	0.46	0.56	0.63	0.69	0.71
Dy	4.59	1.82	3.79	2.40	2.37	3.11	3.33	3.96	4.00
Ho	0.86	0.33	0.70	0.46	0.45	0.58	0.65	0.78	0.79
Y	21.9	8.7	17.0	12.6	12.0	15.6	17.0	19.5	21.4
Er	2.38	0.86	1.67	1.30	1.26	1.58	1.75	2.11	2.26
Tm	0.33	0.11	0.23	0.19	0.18	0.23	0.25	0.30	0.34
Yb	2.10	0.70	1.50	1.27	1.18	1.46	1.59	1.93	2.16
Lu	0.33	0.11	0.22	0.20	0.19	0.24	0.24	0.32	0.35
ΣREE (ppm)	300.07	111.69	342.62	243.62	238.21	254.54	183.26	186.29	201.05
LREE/HREE	6.69	6.21	9.96	9.91	10.29	8.34	5.19	4.44	4.50
(La/Yb) _N	22.24	22.54	38.64	34.79	36.96	29.87	16.24	13.42	12.82
(La/Sm) _N	5.57	4.19	6.59	7.91	9.02	7.19	4.50	4.30	4.39
(Gd/Yb) _N	2.25	2.95	2.98	2.23	2.10	2.21	2.17	1.99	1.73
δEu	0.67	0.90	0.65	0.56	0.78	0.71	0.78	0.69	0.69
δCe	1.05	1.03	1.05	1.03	1.06	1.06	1.05	1.03	1.03

3 测试结果

3.1 全岩地球化学特征

二长花岗岩和花岗闪长岩的主量和微量元素分析结果列于表 1。二长花岗岩具有较高的 SiO₂ 含量 (67.74%-72.53%) 和 Na₂O+K₂O 含量 (6.54%-7.97%), 较低的 CaO (1.65%-3.44%) 和 Fe₂O₃ (1.92%-4.20%)。在 QAP 图解中 (图 4), 4 个样品中有 3 个落入二长花岗岩区, 有一个落入英云闪长岩区, 而在 TAS 图解中 (图 5a), 两个样品落入花岗岩区域, 两个样品落入花岗闪长岩区域。相对于二长花岗岩, 花岗闪长岩具有中等的 SiO₂ (61.99%-65.52%)、Al₂O₃ (15.28%-16.59%)、CaO (4.08%-4.90%) 和 Fe₂O₃ (4.10%-5.27%) 含量以及较高的 Na₂O+K₂O 含量 (6.18%-6.40%)。在 QAP (图 4) 和 TAS 图解中 (图 5a), 5 个样品均落入花岗闪长岩区。二长花岗岩镁指数 (Mg[#]) 变化范围较大 (31-50), 铝指数 Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O) 摩尔比=1.04-1.08, 属于准铝质花岗岩; 而花岗闪长岩镁指数 (Mg[#]) 为 48-51, 铝指数 Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O) 摩尔比=0.90-0.96, 属于准铝质花岗岩。在 SiO₂

vs K_2O 图解中，二长花岗岩样品除了一个样品落入钙碱性系列区域，其余样品均落入高钾钙碱性系列区域（图 5b）；花岗闪长岩则全部落入高钾钙碱性系列区域。

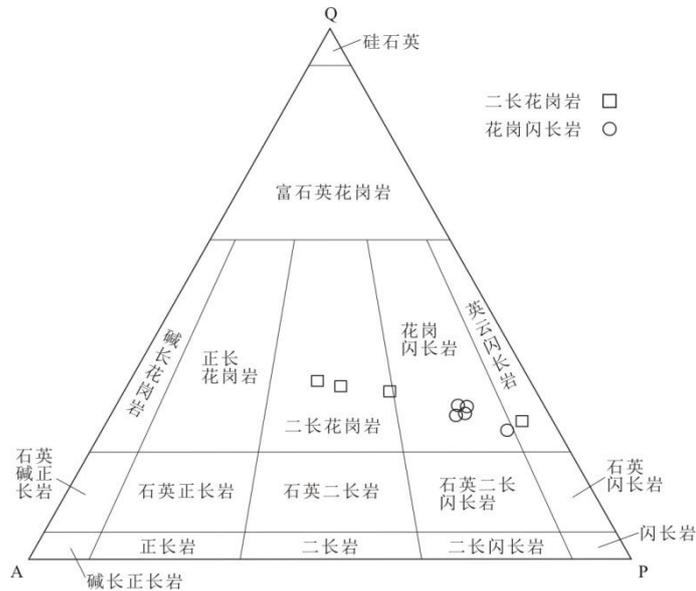


图 4 迈龙二长花岗岩和花岗闪长岩 QAP 图解(底图据 Streckeisen & LeMaitre, 1979)

Fig.4 QAP diagram for the Mailong Monzogranite and Granodiorite (base Map after Streckeisen & LeMaitre, 1979)

二长花岗岩和花岗闪长岩的 REE 球粒陨石标准化图均呈现明显的右倾型（图 5c），轻稀土富集，重稀土相对亏损且分异特征不明显。二长花岗岩 $(La/Sm)_N$ 为 4.19-7.91， $(Gd/Yb)_N$ 为 2.22-2.97， $(La/Yb)_N$ 为 22.24-34.79，有弱的 Eu 负异常 ($\delta Eu=0.56-0.69$)；花岗闪长岩 $(La/Sm)_N$ 为 4.30-9.02， $(Gd/Yb)_N$ 为 1.73-2.21， $(La/Yb)_N$ 为 12.82-36.96，有弱的 Eu 负异常 ($\delta Eu=0.69-0.78$)。在微量元素原始地幔标准化图中（图 5d），二长花岗岩和花岗闪长岩高场强元素相对亏损（HFSE: Nb, Ta, P, Ti）；富集大离子亲石元素（LILE: Rb, K）和元素化学性质活泼的不相容元素（Th 和 U）。这些元素的亏损可能与钛铁氧化物的残留或者矿物的结晶分异作用有关。

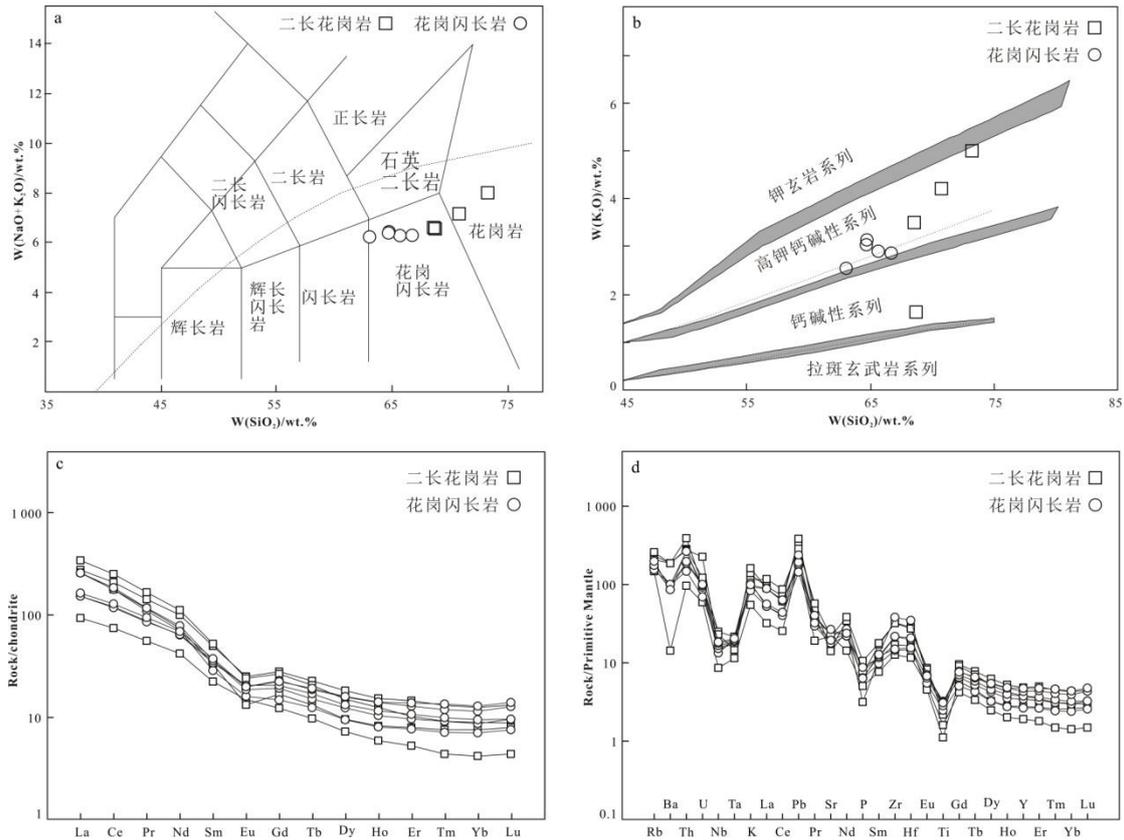


图 5 二长花岗岩和花岗闪长岩 $\text{SiO}_2/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 图解(a. 据 Middlemost, 1994), $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ 图解 (b. 据 Rickwood, 1989), 球粒陨石标准化稀土元素分配图解和原始地幔标准化蛛网图 (c, d 标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.5 SiO_2 vs. $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (a. after Middlemost, 1994), SiO_2 vs. K_2O (b. after Rickwood, 1989), chondrite-normalized REE and primitive-mantle-normalized diagrams (c and d normalized data after Sun and McDonough, 1989) of the monzogranite and granodiorite

3.2 锆石地球化学特征与 U-Pb 年龄

二长花岗岩样品 (MLD056) 锆石为无色透明状, 颗粒以短柱状, 自形粒状为主, 长轴长度为 $100\text{-}200\mu\text{m}$, 长宽比为 $2: 1\text{-}4: 1$, 发育明显的振荡环带结构 (图 6c), 显示岩浆锆石特征。除去 1 个不谐和的锆石数据, 其余 31 个分析点都落在谐和线上或接近谐和线。其中 31 个表观年龄变化范围为 $443\pm 3\text{Ma}$ 到 $405\text{Ma}\pm 5\text{Ma}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $421\pm 1\text{Ma}$ (1σ ; $n=31$), MSWD 值为 0.06 (图 6a)。这些锆石显示了明显 Ce 的正异常和 Eu 的负异常, 轻稀土相对于重稀土亏损 (图 6b), Th/U 比值为 0.1-1.0, 与典型的岩浆锆石特征一致, 也显示了岩浆锆石特征, 因此, 这个年龄可以代表二长花岗岩的形成年龄。另外一个分析点给出了 $880\pm 7\text{Ma}$ 的表观年龄, 代表了继承锆石年龄。U-Pb 同位素定年测试结果见表 2。

花岗闪长岩样品 (MLD186) 锆石为无色透明状, 颗粒以短柱状, 自形粒状为主, 长轴长度为 $100\text{-}350\mu\text{m}$, 长宽比为 $1: 1\text{-}4: 1$, 发育明显的振荡环带结构 (图 6f), 显示岩浆锆石特征。该样品 28 个分析点都落在谐和线上或接近谐和线。其中 28 个表观年龄变化范围为

222±2.5Ma 到 232Ma±2.5Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 228±4Ma (1 σ ; n=28), MSWD 值为 0.05 (图 6d)。这些锆石显示了明显 Ce 的正异常和 Eu 的负异常, 轻稀土相对于重稀土亏损 (图 6e), Th/U 比值为 0.4-0.7, 与典型的岩浆锆石特征一致, 也显示了岩浆锆石特征, 因此, 这个年龄可以代表花岗闪长岩的形成年龄。另外一个分析点给出了 264±5.5Ma 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄, 代表了继承锆石年龄。

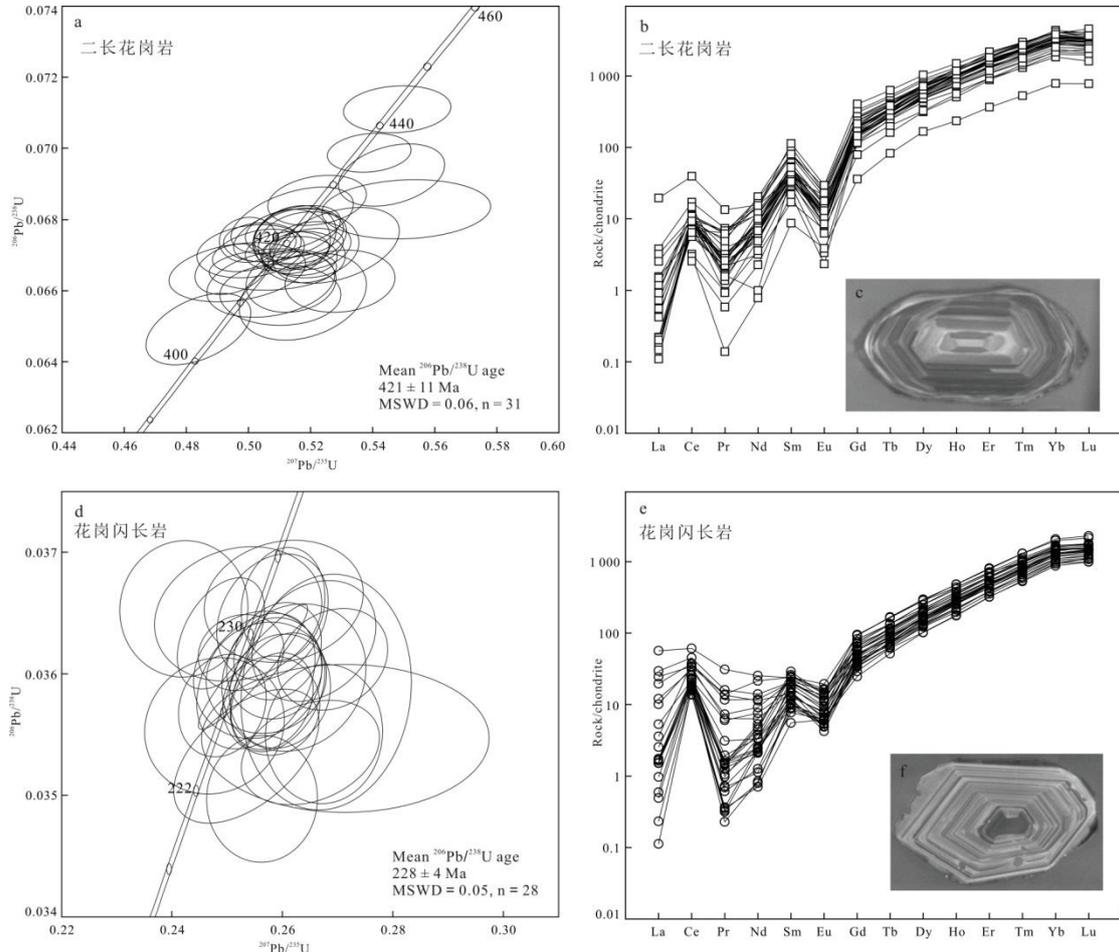


图 6 二长花岗岩和花岗闪长岩锆石年龄谐和图 (a 和 d) 和球粒陨石标准化稀土元素分配图解 (b 和 e) 以及阴极发光图像 (c 和 f)

Fig.6 U-Pb Concordia diagrams (a and d), Chondrite-normalized REE patterns and (b and e) and representative CL images (c and f) for the zircon grains of the monzogranite and granodiorite

表 2 迈龙二长花岗岩和花岗闪长岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果

Table 2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating result of the Mailong monzogranite and granodiorite

点号	含量 ($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
样品 MLD056													
1	193.6	484	0.4	0.05375	1.93	0.5046	2.0	0.06736	0.7	414	7.0	420	2.5
2	95.6	478	0.2	0.05853	4.27	0.5508	4.0	0.06829	1.0	444	15.0	426	4.0
3	247.2	618	0.4	0.05613	2.10	0.5199	2.1	0.06726	0.8	424	7.0	420	3.5
4	188.4	314	0.6	0.05529	3.28	0.5073	3.3	0.06619	1.2	415	11.5	413	4.5
5	170.0	340	0.5	0.05383	3.45	0.4964	3.6	0.06652	1.0	408	12.5	415	4.0

6	146.0	292	0.5	0.05561	2.66	0.5167	2.4	0.06754	0.9	426	7.5	421	4.0
7	222.0	444	0.5	0.05692	2.91	0.5283	3.2	0.06727	1.3	430	11.0	420	5.5
8	210.8	527	0.4	0.05648	2.62	0.5137	2.3	0.06624	1.0	420	8.0	413	4.0
9	171.0	285	0.6	0.05802	2.82	0.5295	2.7	0.06626	1.1	430	9.5	414	4.5
10	232.4	332	0.7	0.05633	3.27	0.5104	3.1	0.06589	1.1	417	10.5	411	4.5
11	345.9	1153	0.3	0.05475	2.49	0.5221	2.5	0.06854	0.8	426	8.5	427	3.5
12	264.4	661	0.4	0.05478	2.78	0.5141	3.1	0.06797	1.1	420	11.0	424	4.5
13	241.0	482	0.5	0.05385	1.87	0.4947	1.9	0.06661	0.9	407	6.5	416	3.5
14	226.0	565	0.4	0.05490	2.47	0.5124	2.8	0.06761	0.9	419	9.5	422	4.0
15	199.2	249	0.8	0.05686	3.27	0.5175	3.2	0.06583	1.5	423	11.5	411	6.0
16	239.0	478	0.5	0.05729	3.05	0.5461	2.5	0.06925	1.0	442	9.0	432	4.5
17	238.2	397	0.6	0.05596	1.81	0.5188	1.9	0.06720	0.7	424	6.5	419	2.5
18	237.5	475	0.5	0.05541	2.65	0.5480	2.6	0.07110	0.8	443	9.5	443	3.0
19	372.0	620	0.6	0.05504	2.38	0.5149	2.5	0.06762	0.8	421	8.5	422	3.5
20	214.4	536	0.4	0.05570	2.27	0.5390	2.0	0.06987	0.6	437	7.5	435	2.5
21	305.0	305	1.0	0.05492	3.28	0.5079	3.3	0.06659	0.7	416	11.5	416	3.0
22	273.0	273	1.0	0.05618	2.34	0.5178	2.1	0.06694	0.9	423	7.5	418	3.5
23	270.0	675	0.4	0.05368	1.62	0.4998	1.5	0.06744	0.8	411	5.0	421	3.0
24	66.2	662	0.1	0.05534	2.20	0.5148	2.1	0.06749	1.1	421	7.5	421	4.5
25	165.6	414	0.5	0.05605	2.66	0.5195	2.6	0.06729	1.1	424	8.5	420	4.5
26	83.2	208	0.4	0.05406	2.90	0.5007	2.8	0.06710	0.9	411	9.5	419	3.5
27	145.8	486	0.3	0.05547	2.15	0.5142	2.0	0.06738	1.1	421	6.5	420	4.5
28	176.0	352	0.5	0.05509	2.42	0.5125	2.1	0.06710	0.7	419	7.5	419	2.5
29	144.4	361	0.4	0.05409	1.97	0.5019	2.2	0.06713	0.7	412	7.5	419	3.0
30	328.0	410	0.8	0.05431	3.53	0.4839	2.9	0.06492	1.3	400	9.5	405	5.0
31	155.2	388	0.4	0.05585	2.08	0.5164	2.0	0.06698	0.7	422	7.0	418	2.5

样品 MLD186

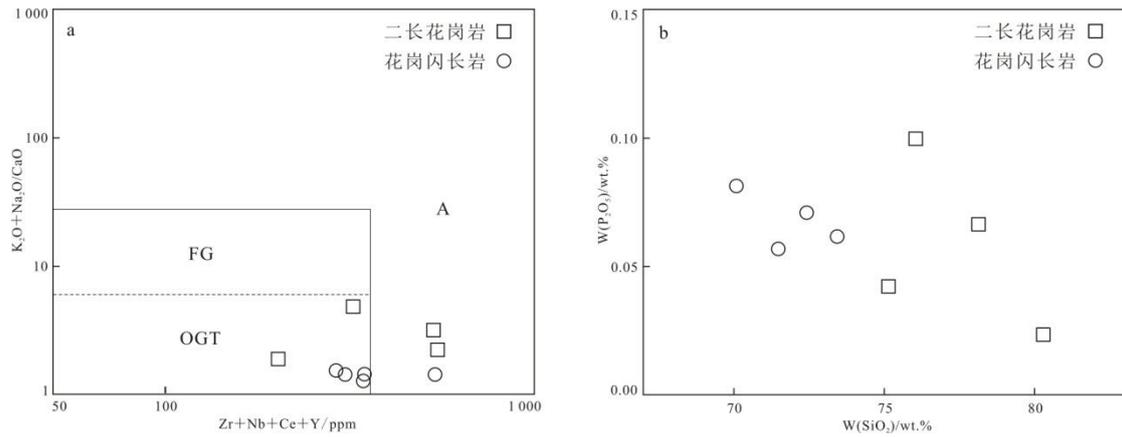
1	120.8	302	0.4	0.05481	3.51	0.2675	3.2	0.03551	1.3	240	7.0	225	3.0
2	101.4	169	0.6	0.05263	4.11	0.2555	3.7	0.03599	1.2	230	7.5	228	2.5
3	168.5	337	0.5	0.05302	3.27	0.2657	3.5	0.03627	1.1	238	7.5	230	2.5
4	120.8	302	0.4	0.05124	3.16	0.2547	3.2	0.03606	1.2	230	6.5	228	2.5
5	146.4	244	0.6	0.05542	7.77	0.2714	7.8	0.03547	1.4	242	17.0	225	3.0
6	103.5	207	0.5	0.05287	4.05	0.2621	4.1	0.03597	1.4	235	8.5	228	3.0
7	213.0	426	0.5	0.05392	2.93	0.2691	3.0	0.03612	0.9	241	6.5	229	2.0
8	87.0	174	0.5	0.05152	4.50	0.2602	4.5	0.03660	1.1	233	9.5	232	2.5
9	110.6	158	0.7	0.05054	4.34	0.2477	4.2	0.03557	1.3	223	8.5	225	3.0
10	151.8	253	0.6	0.04812	3.98	0.2421	3.9	0.03654	1.3	219	8.0	231	3.0
11	210.6	351	0.6	0.05181	2.50	0.2591	2.5	0.03619	0.9	233	5.5	229	2.0
12	131.0	262	0.5	0.05229	3.48	0.2552	3.4	0.03594	1.3	234	8.0	228	3.0
13	111.0	222	0.5	0.04979	4.87	0.2520	4.9	0.03649	1.2	226	9.5	231	3.0
14	125.0	250	0.5	0.05428	5.02	0.2679	4.7	0.03585	2.2	240	10.0	227	5.0
15	211.0	422	0.5	0.05225	2.55	0.2591	2.7	0.03585	1.1	233	5.5	227	2.5
16	223.8	373	0.6	0.05224	2.73	0.2601	2.4	0.03657	1.0	234	5.0	232	2.5
17	196.8	328	0.6	0.05123	3.12	0.2582	3.2	0.03647	1.2	236	7.5	231	2.5

18	196.2	327	0.6	0.05177	3.62	0.2571	3.5	0.03597	1.0	231	7.5	228	2.5
19	290.0	580	0.5	0.05044	2.52	0.2525	2.5	0.03618	0.7	228	5.0	229	1.5
20	258.6	431	0.6	0.05228	2.92	0.2580	2.8	0.03574	0.9	232	6.0	226	2.0
21	240.0	400	0.6	0.05042	2.66	0.2491	2.6	0.03574	1.0	225	5.5	226	2.0
22	108.5	217	0.5	0.05155	3.83	0.2535	4.2	0.03532	1.3	228	9.0	224	3.0
23	290.4	484	0.6	0.05244	2.94	0.2596	2.9	0.03586	1.1	234	6.0	227	2.5
24	298.8	498	0.6	0.05214	2.30	0.2581	2.4	0.03577	0.9	233	5.0	227	2.0
25	180.5	361	0.5	0.05409	3.70	0.2651	3.9	0.03535	1.0	238	8.0	224	2.0
26	180.5	361	0.5	0.05311	3.37	0.2563	3.2	0.03497	1.2	231	6.5	222	2.5
27	327.6	546	0.6	0.05192	2.80	0.2586	2.7	0.03605	0.9	233	5.5	228	2.0
28	174.0	348	0.5	0.04942	2.38	0.2489	2.6	0.03633	1.0	225	5.5	230	2.5

4 讨论

4.1 岩石成因

根据地球化学成分和形成环境,花岗岩通常可以分为 M 型、I 型、S 型和 A 型花岗岩。迈龙金矿区的二长花岗岩和花岗闪长岩产于古元古代金水口群片麻岩中,其中,二长花岗岩样品具有较高的 SiO_2 (67.74%-72.53%), 富 K_2O (3.48%-4.96%), 贫 CaO (1.65%-3.44%)、 MgO (0.43%-1.23%), 低 Fe_2O_3 (1.92%-4.20%)、 TiO_2 (0.23%-0.60%)、 P_2O_5 (0.05%-0.21%) 的特点,而花岗闪长岩样品则具有中等的 SiO_2 (61.99%-65.52%)、 Al_2O_3 (15.28%-16.59%)、 CaO (4.08%-4.90%)、 MgO (2.02%-2.67%) 和 Fe_2O_3 (4.10%-5.27%), 低 TiO_2 (0.54%-0.68%)、 P_2O_5 (0.12%-0.17%), 以及较高的 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量 (6.18%-6.40%); 在花岗岩分类图解中大部分落于未分异的 M、I 和 S 型花岗岩中,表明这些岩体不属于 A 型花岗岩。此外, M 型花岗岩形成于基性岩浆房分异作用,是蛇绿岩套的一部分,这也与迈龙金矿区的二长花岗岩和花岗闪长岩产状明显不同。实验研究表明, P_2O_5 在 I 型花岗岩和 S 型花岗岩有着不同的地球化学行为,即随着岩浆的结晶分异, S 型花岗岩的 P_2O_5 含量呈现升高或者保持不变的特点,而 I 型花岗岩则会逐渐降低 (Chappell, 1999)。迈龙金矿区的二长花岗岩和花岗闪长岩在 SiO_2 上升的过程中伴随 P_2O_5 含量的下降 (图 7), A/CNK 值 (0.90-1.08) 小于 1.1, 属于 I 型花岗岩类的特征,且该结论受到岩石中角闪石和磁铁矿的支持。 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO}+\text{FeO})$ 介于 1-3 之间, $\text{CaO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$ 集中于 0.6-1.0 之间,根据 C/FM-A/FM 图解 (图 8), 除两个样品落入杂砂岩源区外,其余样品均落入英云闪长岩源区。研究区二长花岗岩和花岗闪长岩均显示高钾钙碱性系列、准铝质特征,暗示其源岩可能为中基性岛弧型火山岩部分熔融或者是与形成岛弧型火山岩同源的岩浆演化形成。



FG: 分异的 M, I 和 S 型花岗岩; OGT: 未分异的 M, I 和 S 型花岗岩

图 7 $(K_2O+Na_2O)/CaO/(Zr+Nb+Ce+Y)$ 图解 (a) 和 SiO_2/P_2O_5 图解 (b)
(据 Whalen et al., 1987)

Fig.7 $(K_2O+Na_2O)/CaO$ vs. $(Zr+Nb+Ce+Y)$ (a); SiO_2 vs. P_2O_5 (b) (after Whalen et al., 1987)

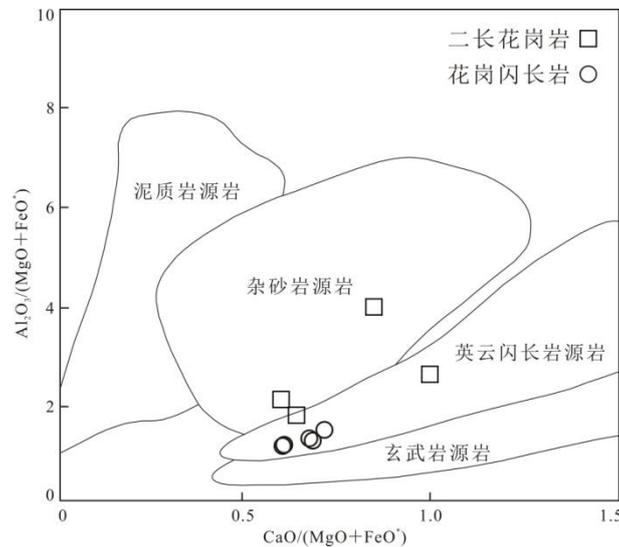


图 8 迈龙花岗岩 C/MF-A/MF 图解 (据 Gerdes et al., 2000)

Fig.8 C/MF-A/MF diagram for Mailong granite (after Gerdes et al., 2000)

迈龙金矿区二长花岗岩和花岗闪长岩微量元素的稀土总量 (ΣREE) 较高, 且富集轻稀土 (LREE) 元素、大离子亲石元素 (LILE: Rb, K) 和地球化学性质活泼的不相容元素 (U, Th, Pb), 相对亏损高场强元素 (HFSE: Nb, Ta, P, Ti), 稀土元素配分曲线显示出明显的右倾, 并且存在 Eu 的负异常, 这表明在岩浆演化过程中可能存在斜长石的分离结晶作用, 这些地球化学特征均显示二长花岗岩和花岗闪长岩具有岛弧岩浆岩的地球化学属性。

在 Y-Sr/Y 图解中 (图 9a), 二长花岗岩和花岗闪长岩落入典型的岛弧区域, 而在 Rb-Yb+Nb 图解中 (图 9b), 二者落入岛弧花岗岩区域, 这些特征也显示了其岩浆源区与岛弧火山岩的一致性, 表明其与岛弧岩浆岩的地球化学亲缘性。二长花岗岩和花岗闪长岩属于高钾钙碱性系列 (除 1 个样品为钙碱性系列), 前人研究表明这类岩石很可能形成源于地壳

基性-中性(变质)火成岩的部分熔融(Chappell and White, 2001),或壳源和幔源岩浆的混合(Kemp et al., 2007)。二长花岗岩和花岗闪长岩 Nb/Ta 比值变化范围分别为 12.98-27.33 和 11.59-15.75,位于地壳和球粒陨石 Nb/Ta 比值之间(分别为~20 和~12, Rudnick et al., 1995); Zr/Hf 比值分别为 37.45-42.74 和 35.00-39.72,与地幔源区的 Zr/Hf=36 值相当。此外,根据实验岩石学的证据,来源于下地壳部分熔融的岩浆岩一般有较低的 MgO 和 Mg[#](低于 45; Hou et al., 2004),而本次研究二长花岗岩和花岗闪长岩 Mg[#]值变化范围分别为 31-50 和 48-50,显然,二者不可能单独由下地壳或中基性岩石直接部分熔融产生,而更有可能在形成过程中有幔源岩浆的加入。结合岩石学和地球化学证据,可以推断迈龙金矿区的二长花岗岩和花岗闪长岩可能与岛弧构造背景有关,该区域的构造活动可能导致地壳物质的部分熔融,同时幔源岩浆的加入进一步改变了岩浆的化学组成。因此,迈龙金矿区的二长花岗岩和花岗闪长岩可能是由壳源和幔源岩浆的混合作用的结果。

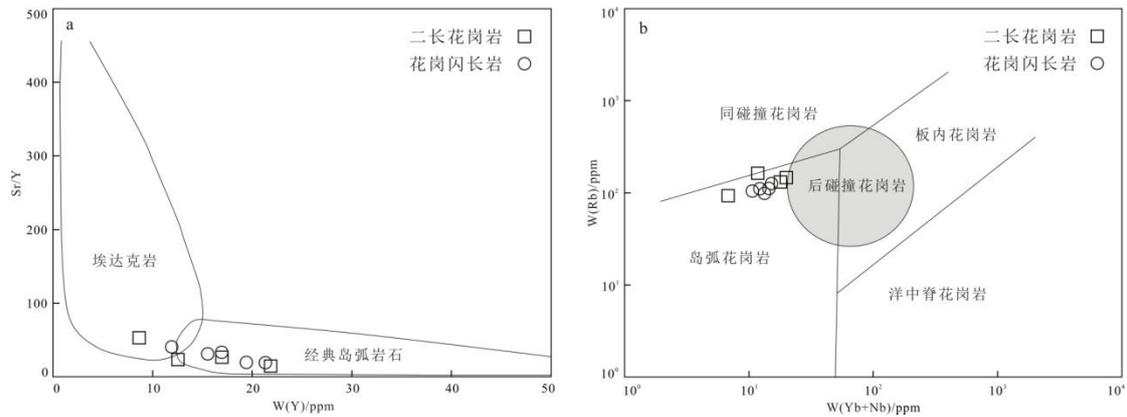


图9 二长花岗岩和花岗闪长岩 Sr/Y 与 Y 图解和 Rb 与(Yb+Nb)图解(修改自 Pearce et al., 1996)

Fig.9 Sr/Y vs. Y and Rb vs. (Yb+Nb) diagrams of the monzogranite and granodiorite (modified from Pearce et al., 1996)

4.2 构造背景

东昆仑造山带是典型的复合增生造山带,经历了早古生代原特提斯和晚古生代-早中生代古特提斯两期造山作用,与这两期造山作用相关的岩浆活动在该区域广泛出露(陈加杰, 2018; 陈国超等, 2020)。

东昆仑造山带已经报道的与原特提斯造山作用相关的岩浆活动如表 3 所示,前人研究表明,这些岩浆活动与原特提斯洋的俯冲、碰撞和后碰撞的伸展引起的壳幔相互作用相关,但是对于俯冲、碰撞和后碰撞的具体时限存在争议。一部分学者认为,原特提斯洋的俯冲在 441Ma 以前就已经结束(莫宣学等, 2007),而另外一部分学者则认为东昆仑造山带地区 430Ma 仍存在俯冲相关的岩浆活动,并未进入碰撞阶段(Li et al., 2015)。事实上,陆露等

(2010)对东昆南地体造山后形成的火山-沉积盆地内形成的牦牛山组磨拉石建造开展锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究, 表明其形成于 423-400Ma。另外, 东昆仑造山带广泛发育的造山后伸展阶段形成的 A 型花岗岩 (425-391Ma, 陈加杰, 2018) 和角闪岩相-麻粒岩相变质岩 (427-408Ma, 孟繁聪等, 2013; 陈加杰, 2018; 国显正等, 2018), 同样表明在东昆仑造山带地区在 430Ma 以后已经进入伸展阶段。再者, 本文研究表明迈龙金矿区的二长花岗岩侵入到古元古代金水口岩群片麻岩中, 其结晶年龄 (421Ma) 处于志留纪岩浆活动的时限内, 并且地球化学特征 (较高的 Nb/Ta 比值和 Mg# 值) 指示其形成于壳源和幔源岩浆的混合作用。这表明随着后碰撞的进行, 下地壳物质受幔源物质上侵带来的热发生部分熔融, 形成大量的中酸性浆, 同时有少量地幔熔融物质上涌与壳源岩浆发生混染, 形成迈龙具有岛弧性质的花岗岩。因此, 结合前人研究, 本文认为迈龙金矿区的二长花岗岩形成于造山后伸展阶段的壳幔相互作用。

表 3 东昆仑造山带与原特提斯造山作用有关的部分岩体 U-Pb 年龄统计表

Table 3 Table of U-Pb ages of rock related to the Proto-Tethys orogeny in the East Kunlun orogenic belt

岩体位置	岩性	测试年龄	文献来源
都兰县可可沙地区	石英闪长岩	515 ± 4Ma	张亚峰等, 2010
格尔木南水泥厂地区	玄武岩	474 ± 8Ma	陈有忻等, 2013
东昆仑南缘白日切特及地区	花岗闪长岩	441 ± 6Ma	刘战庆等, 2011
	流纹斑岩	438 ± 3Ma	
东昆仑南缘亿可哈拉尔地区	花岗闪长岩	435 ± 3Ma	Li et al., 2015
	花岗岩	436.9 ± 5.7Ma	
白干湖钨锡矿田	二长花岗岩	431 ± 1Ma	高永宝, 2013
沟里敖洼得地区	花岗闪长岩	454 ± 2Ma	
沟里淡水沟地区	二长花岗岩	418 ± 3Ma	陈加杰, 2018
	正长花岗岩	418 ± 3Ma	
沟里念堂地区	正长花岗岩	403 ± 2Ma	
沟里浪木日地区	黑云母花岗岩	414.5 ± 8.8Ma	童海奎等, 2023

东昆仑造山带已经报道的与古特提斯造山作用相关的岩浆活动如表 4 所示, 这些岩浆岩, 尤其是花岗质岩体中普遍发育暗色包体, 关于这些岩石的成岩构造背景及成因主要存在两种不同的解释, 一部分学者认为这些岩浆岩主要形成于古特提斯洋闭合后的陆陆碰撞阶段, 与俯冲残留板片的部分熔融有关 (Huang et al., 2014), 另外一部分学者则认为这些岩浆岩形成于古特提斯洋的俯冲阶段, 与下地壳的部分熔融有关 (陈加杰, 2018)。事实上, 最近对东昆仑地区海相沉积的希利可特组和河湖相沉积的八宝山组研究表明, 八宝山组于 237Ma 左右不整合于希利可特组之上 (陈加杰, 2018)。另外, 东昆仑造山带广泛发育碰撞造山阶

段形成的 S 型花岗岩 (240Ma) 和 A 型花岗岩 (231Ma) (王凤林, 2023)。而东昆仑造山带在 230-200Ma 期间处于后碰撞阶段 (陈国超等, 2020), 并且范兴竹 (2022) 报道了沟里地区的哈日扎英安岩 (227.9Ma) 和晶屑凝灰岩 (225Ma), 以及那更康切尔的安山岩 (218Ma) 和流纹岩 (221.3Ma) 的年龄, 也认为 230~201Ma 的岩浆作用形成于强烈的后碰撞伸展背景。本次研究迈龙金矿区的花岗闪长岩 (228Ma) 地球化学特征 (较高的 Nb/Ta 比值和 Mg# 值) 指示其形成于壳源和幔源岩浆的混合作用, 这也与碰撞后伸展引起的壳幔岩浆作用一致, 与矿区二长花岗岩类似, 花岗闪长岩的形成也经历了下地壳物质受幔源物质上侵带来的热发生部分熔融, 同时有少量地幔熔融物质上涌与壳源岩浆发生混染。因此, 结合前人研究, 本文认为迈龙金矿区的花岗闪长岩形成于造山后伸展阶段。

表 4 东昆仑造山带与古特提斯造山作用有关的部分岩体 U-Pb 年龄统计表

Table 4 Table of U-Pb ages of rock related to the Paleo-Tethys orogeny in the East Kunlun orogenic belt

岩体位置	岩性	测试年龄	文献来源
巴龙南部瑙木浑地区	花岗闪长岩	261 ± 2Ma	Xiong et al., 2012
五龙沟地区岩金沟矿区	花岗闪长岩	259 ± 2Ma	李希等, 2014
哈拉杂吐地区	花岗闪长岩	255 ± 4Ma	孙雨, 2009
跃进山地区	煌斑岩脉	253 ± 3Ma	Xiong et al., 2012
	花岗闪长岩	242.5 ± 1.6Ma	
巴龙地区	石英闪长岩	241.0 ± 2.2Ma	Zhang et al., 2012
	正长花岗岩	231.0 ± 2.6Ma	
香日德地区	花岗闪长岩	242 ± 1Ma	陈加杰, 2018
阿斯哈地区	花岗闪长岩	240 ± 2Ma	王凤林, 2023
哈日扎地区	花岗岩	255Ma	马忠元等, 2024

作为中国重要的金矿田之一, 东昆仑造山带发育有多个大中型金矿床, 这些金矿床的形成于早古生代原特提斯和晚古生代-早中生代古特提斯两期造山作用密切相关。通过统计这些金矿的形成年龄, 本文发现果洛龙洼 (409.06 ± 1.42Ma, 陈加杰, 2018) 和接纳格 (383-349Ma, Chen et al., 2020) 金矿床形成于原特提斯造山后伸展阶段, 而阿斯哈 (234.63 ± 1.22Ma, 陈加杰, 2018)、瓦勒尕 (234-217Ma, 陈加杰, 2018)、五龙沟 (236.5 ± 0.5Ma, 张德全等, 2005)、大场 (218.6 ± 3.2Ma, 张德全等, 2005) 等金矿形成于古特提斯造山后伸展阶段。野外证据表明, 迈龙金矿矿化主要发育在花岗闪长岩中, 结合它们的形成年龄, 迈龙金矿可能与古特提斯造山后伸展阶段的构造-岩浆作用相关。

5 结论

- (1) 迈龙二长花岗岩和花岗闪长岩均显示准铝质、高钾钙碱性、富集大离子亲石元素,

亏损高场强元素的地球化学特征。

(2) 二长花岗岩和花岗闪长岩年龄分别为 $421 \pm 11\text{Ma}$ 和 $228 \pm 4\text{Ma}$, 指示形成时代分别为晚志留世和晚三叠世。

(3) 迈龙二长花岗岩和花岗闪长岩均落入岛弧花岗岩区域, 表明二者均形成于俯冲相关的岩浆活动, 结合前人已有研究, 迈龙二长花岗岩和花岗闪长岩分别形成于原特提斯和古特提斯造山后伸展阶段的壳幔相互作用。

References:

- Chappell, B.W., 1999. Aluminium Saturation in I-and S-type Granites and the Characterization of Fractionated Haplogranites. *Lithos*, 46(3) : 535-551. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00086-3](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00086-3)
- Chappell, B.W., White, A.J.R., 2001. Two Contrasting Granite Types: 25 Years Later. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(1) : 489-499. <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2001.00882.x>
- Chen, G.C., Pei, X.Z., Li, R.B., et al., 2020. Late Palaeozoic-Early Mesozoic Tectonic-magmatic Evolution and Mineralization in the Eastern Section of the East Kunlun Orogenic Belt. *Earth Science Frontiers*, 27(4): 033-04(in Chinese with English abstract).
- Chen, J.J., 2018. Paleozoic-Mesozoic Tectono-magmatic Evolution and Gold Mineralization in Gouli Area, East End of East Kunlun Orogen(*Dissertation*). China University of Geosciences, Wuhan: 97-133(in Chinese with English abstract).
- Chen, J.J., Fu, L.B., Selby, D., et al., 2020. Multiple Episodes of Gold Mineralization in the East Kunlun Orogen, Western Central Orogenic Belt, China: Constraints From Re-Os Sulfide Geochronology. *Ore Geology Reviews*, 123: 103587. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103587>
- Chen, Y.X., Pei, X.Z., Li, R.B., et al., 2013. Zircon U-Pb Age, Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Meta-Volcanic Rocks From Nachitai Group, East Section of East Kunlun. *Earth Science Frontiers*, 20(6): 240-254(in Chinese with English abstract).
- Fan, X.Z., 2022. Research on Metallogenesis of Ag Polymetallic Deposits in the East Segment of the East Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province(*Dissertation*). Jilin University, Changchun: 172-175(in Chinese with English abstract).
- Feng, C.Y., Zhang, D.Q., Wang, F.C., et al., 2004. Geochemical Characteristics of Ore-forming Fluids From the Orogenic Au(and Sb) Deposits in the Eastern Kunlun Area, Qinghai province. *Acta Petrologica Sinica*, 20(4), 949-960(in Chinese with English abstract).
- Gao, Y.B., 2013. The Intermediate-acid Intrusive Magmatism and Mineralization in Qimantag, East Kunlun Mountains(*Dissertation*).: Chang'an University, Xi'an: 36-54(in Chinese with English abstract).
- Gerdes, A., Worner, G., Henk, A., 2000. Post-collisional Granite Generation and HT-LP Metamorphism by Radiogenic Heating: the Example From the Variscan South Bohemian Batholith. *Journal of the Geological Society, London*, 157: 577-587. <https://doi.org/10.1144/jgs.157.3.577>

- Guo, X.Z., Jia, Q.Z., Li, J.C., et al., 2018. Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry and Their Geological Significances of Eclogites From East Kunlun High-Pressure Metamorphic Belt. *Earth Science*, 43(12): 4300-4318(in Chinese with English abstract).
- Huang, H., Niu, Y.L., Nowell, G., et al., 2014. Geochemical Constraints on the Petrogenesis of Granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibetan Plateau: Implications for Continental Crust Growth through Syn-collisional Felsic Magmatism. *Chemical Geology*, 370: 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.01.010>
- Hou, Z.Q., Gao, Y.F., Qu, X.M., et al., 2004. Origin of Adakitic Intrusives Generated During Mid-Miocene East-West Extension in Southern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(1): 139-155. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(04\)00007-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(04)00007-X)
- Kemp, A.I.S., Hawkesworth, C.J., Foster, G.L., et al., 2007. Magmatic and Crustal Differentiation History of Granitic Rocks From Hafnium and Oxygen Isotopes in Zircon. *Science*, 315(5814): 980-983. <https://doi.org/10.1126/science.1136154>
- Li, B., Wei, J.H., Gao, Q., et al., 2024. Geochronology, Geochemical Characteristics and Geological Significance of Early Paleozoic Mailong Granites in the Eastern Section of East Kunlun. *Earth Science*(in Chinese with English abstract).
- Li, C.Y., Zhang, H., Wang, F.Y., et al., 2012. The Formation of the Dabaoshan Porphyry Molybdenum Deposit Induced by Slab Rollback. *Lithos*, 150: 101-110. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.04.001>
- Li, R.B., Pei, X.Z., Li, Z.C., et al., 2015. Geochemistry and Zircon U-Pb Geochronology of Granitic Rocks in the Buqingshan Tectonic Melange Belt, Northern Tibet Plateau, China and Its Implications for Prototethyan Evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 105: 374-389. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.02.004>
- Li, X., Yuan, W.M., Hao, N.N., et al., 2014. Characteristics and Tectonic Setting of Granite in Wulonggou Area, East Kunlun Mountains. *Global Geology*, 33(2): 275-288(in Chinese with English abstract).
- Li, X.H., Qi, C.S., Liu, Y., et al., 2005. Petrogenesis of the Neoproterozoic Bimodal Volcanic Rocks Along the Western Margin of the Yangtze Block: New Constraints From Hf Isotopes and Fe/Mn Ratios. *Chinese Science Bulletin*, 50(21): 2481-2486. <https://doi.org/10.1360/982005-287>
- Liu, Z.Q., Pei, X.Z., Li, R.B., et al., 2011. Early Paleozoic Intermediate-acid Magmatic Activity in Bairiqiete Area Along the Buqingshan Tectonic Melange Belt on the Southern Margin of East Kunlun: Constraints From Zircon U-Pb Dating and Geochemistry. *Geology in China*, 38(5): 1150-1167(in Chinese with English abstract).
- Lu, L., Wu, Z.H., Hu, D.G., et al., 2010. Zircon U-Pb Age for Rhyolite of the Maoniushan Formation and Its Tectonic Significance in the East Kunlun Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1150-1158(in Chinese with English abstract).
- Ma, Z.Y., Chai, J.X., Zhang, A.K., et al., 2024. Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of the Harizha-Nagengkangqieer Granites in the East Kunlun Orogen. *Earth Science*, 49(5): 1778-1792(in Chinese with English abstract).
- Mo, X.X., Luo, Z.H., Deng, J.F., et al., 2007. Granitoids and Crustal Growth in the East-Kunlun Orogenic Belt. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 403-414(in Chinese with English abstract).
- Meng, F.C., Cui, M.H., Wu, X.K., et al., 2013. Magmatic and Metamorphic Events Recorded

- in Granitic Gneisses From the Qimantag, East Kunlun Mountains, Northwest China. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2107-2122(in Chinese with English abstract).
- Middlemost, E.A.K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37(3-4): 215-224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Pearce, J.A., 1996. Sources and Settings of Granitic Rocks. *Episodes*, 19(4): 120-125. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199612\)21:12<1163::AID-ESP666>3.3.CO](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199612)21:12<1163::AID-ESP666>3.3.CO)
- Rickwood, P.C., 1989. Boundary Lines within Petrologic Diagrams which Use Oxides of Major and Minor Elements. *Lithos*, 22(4): 247-263. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(89\)90028-5](https://doi.org/10.1016/0024-4937(89)90028-5)
- Rudnick, R.L., Fountain, D.M., 1995. Nature and Composition of the Continental Crust: A Lower Crustal Perspective. *Reviews of Geophysics*, 33(3): 267-309. <https://doi.org/10.1029/95RG01302>
- Shen, Z.Y., Wang, T.K., Jing, G.Z., et al., 2022. Analysis of Ore Prospecting of Mailong-Seri Area, Dulan County, Qinghai Province and the Target Delineation. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 37(3): 291-301(in Chinese with English abstract).
- Streckeisen, A., Le, Maitre, W., 1979. A Chemical Approximation to the Model QAPF Classification of the Igneous Rocks. *Neues Jahrb Mineral Abh*, 136(2): 169-206.
- Sun, S.S and McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society*, 42(1): 313-345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Sun, Y., Pei, X.Z., Ding, S.P., et al., 2009. Halagatu Magma Mixing Granite in the East Kunlun Mountains: Evidence From Zircon U-Pb Dating. *Acta Geologica Sinica*, 83(7): 1000-1010(in Chinese with English abstract).
- Tong, H.K., Long, L.L., Wang, Y.W., et al., 2023. Metallogenic Characteristics of Langmuri Copper Polymetallic Deposit in East Kunlun and Its Ore Prospecting Enlightenment. *Earth Sciences*, 48(12): 4349-4369(in Chinese with English abstract).
- Wang, F.L., 2023. Metallogenic Mechanism and Prognosis Based on Comprehensive Information for Gold Deposits in the Asiha-Walega Area, Eastern Segment of the East Kunlun Orogen(*Dissertation*). China University of Geosciences, Wuhan: 63-79(in Chinese with English abstract).
- Whalen, J.B., Currie, K.L., Breemen, O.van., 1987. Episodic Ordovician-Silurian Plutonism in the Topsails Igneous Terrane, Western Newfoundland. Transactions of the Royal Society of Edinburgh. *Earth Sciences*, 8(1): 17-28. <https://doi.org/10.1017/S0263593300010920>
- Xiong, F.H., Ma, C.Q., Zhang, J.Y., et al., 2012. The Origin of Mafic Microgranular Enclaves and Their Host Granodiorites From East Kunlun, Northern Qinghai-Tibet Plateau: Implications for Magma Mixing During Subduction of Paleo-Tethyan Lithosphere. *Mineralogy and Petrology*, 104: 211-224. <https://doi.org/10.1007/s00710-011-0187-1>
- Xu, Z.Q., Yang, J.S., Li, H.B., et al., 2006. The Qinghai-Tibet Plateau and Continental Dynamics: A Review on Terrain Tectonics, Collisional Orogenesis, and Processes and Mechanisms for the Rise of the Plateau. *Geology in China*, 33(2): 221-238(in Chinese with English abstract).
- Zhai, W., Zheng, S.Q., Zhang, L.Y., et al., 2021. In Situ Pyrite Sulfur Isotope and Trace Element Analyses of the World-class Dachang Gold Deposit, Northern Qinghai-Tibetan Plateau: Implications for Metallogenesis. *Ore Geology Reviews*, 138: 104-347. <https://doi.org/10.1016/J.OREGEOREV.2021.104347>
- Zhang, D.Q., Dang, X.Y., She, H.Q., et al., 2005. Ar-Ar Dating of Orogenic Gold Deposits

in Northern Margin of Qaidam and East Kunlun Mountains and Its Geological Significance. *Mineral Deposits*, 24(2): 87-98(in Chinese with English abstract).

Zhang, J.Y., Ma, C.Q., Xiong, F.H., et al., 2012. Petrogenesis and Tectonic Significance of the Late Permian-Middle Triassic Calc-alkaline Granites in the Balong rRegion, Eastern Kunlun Orogen, China. *Geological Magazine*, 149(5): 892-908. <https://doi.org/10.1017/S0016756811001142>

Zhang, Y.F., Pei, X.Z., Ding, S.P., et al., 2010. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age of Quartz Diorite At the Kekesha Area of Dulan County, Eastern Section of the East Kunlun Orogenic Belt, China and Its Significance. *Geological Bulletin of China*, 29(1): 79-85(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

陈国超, 裴先治, 李瑞保, 等, 2020. 东昆仑造山带东段晚古生代-早中生代构造岩浆演化与成矿作用. *地学前缘*, 27(4): 033-04.

陈加杰, 2018. 东昆仑造山带东端沟里地区构造岩浆演化与金成矿(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学, 97-133.

陈有炘, 裴先治, 李瑞保, 等, 2013. 东昆仑东段纳赤台岩群变火山岩锆石U-Pb年龄, 地球化学特征及其构造意义. *地学前缘*, 20(6): 240-254.

范兴竹, 2022. 青海省东昆仑东段银多金属矿床成矿作用研究(博士学位论文). 长春: 吉林大学, 172-175.

丰成友, 张德全, 王富春, 等, 2004. 青海东昆仑造山型金(锑)矿床成矿流体地球化学研究. *岩石学报*, 20(4), 949-960.

高永宝, 2013. 东昆仑祁漫塔格地区中酸性侵入岩浆活动与成矿作用(博士学位论文). 西安: 长安大学, 36-44.

国显正, 贾群子, 李金超, 等, 2018. 东昆仑高压变质带榴辉岩年代学, 地球化学及其地质意义. *地球科学*, 43(12): 4300-4318.

李斌, 魏俊浩, 高强, 等, 2024. 东昆仑东段沟里地区早古生代迈龙花岗岩年代学、岩石地球化学及地质意义. *地球科学*.

李希, 袁万明, 郝娜娜, 等, 2014. 东昆仑五龙沟花岗岩特征及其构造背景. *世界地质*, 33(2): 275-288.

刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 等, 2011. 东昆仑南缘布青山构造混杂岩带早古生代白日切特中酸性岩浆活动: 来自锆石U-Pb测年及岩石地球化学证据. *中国地质*, 38(5): 1150-1167.

陆露, 吴珍汉, 胡道功, 等, 2010. 东昆仑牦牛山组流纹岩锆石U-Pb年龄及构造意义. *岩石学报*, 26(04): 1150-1158.

马忠元, 柴佳兴, 张爱奎, 等, 2024. 东昆仑哈日扎-那更康切尔银矿区花岗岩年代学、地球化学及岩石成因. *地球科学*, 49(5): 1778-1792.

莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等, 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长. *高校地质学报*, 13(3): 403-414.

孟繁聪, 崔美慧, 吴祥珂, 等, 2013. 东昆仑祁漫塔格花岗片麻岩记录的岩浆和变质事件. *岩石学报*, 29(6): 2107-2122.

沈志远, 汪统科, 井国正, 等, 2022. 青海省都兰县迈龙-色日地区找矿信息分析及靶区圈定. *地质找矿论丛*, 37(3): 291-301.

孙雨, 裴先治, 丁仁平, 等, 2009. 东昆仑哈拉杂吐岩浆混合花岗岩: 来自锆石U-Pb年代学

- 的证据. 地质学报, 83(7): 1000-1010.
- 童海奎, 龙灵利, 王玉往, 等, 2023. 东昆仑浪木日铜多金属矿床成矿特征及找矿启示. 地球科学, 48(12): 4349-4369.
- 王凤林, 2023. 东昆仑东段阿斯哈-瓦勒尕地区金成矿机制研究及综合信息成矿预测(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学, 63-79.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等, 2006. 青藏高原与大陆动力学-地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力. 中国地质, 33(2): 221-238.
- 张德全, 党兴彦, 余宏全, 等, 2005. 柴北缘-东昆仑地区造山型金矿床的Ar-Ar测年及其地质意义. 矿床地质, 24(2): 87-98.
- 张亚峰, 裴先治, 丁仁平, 等, 2010. 东昆仑都兰县可可沙地区加里东期石英闪长岩锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄及其意义. 地质通报, 29(1): 79-85.