



引文格式: 李宇轩, 陈博, 王斌, 等. 吉尔吉斯斯坦库鲁-捷格列克铜金矿床成矿岩体地球化学特征及其地质意义[J]. 西北地质, 2026, 59(1): 172-188. DOI: 10.12401/j.nwg.2024135

Citation: LI Yuxuan, CHEN Bo, WANG Bin, et al. Geochemical Characteristics and Genesis of Intrusive Ore-Forming Rock Bodies in the Kuru-Tegerek Copper-Gold Deposit, Kyrgyzstan[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(1): 172-188. DOI: 10.12401/j.nwg.2024135

吉尔吉斯斯坦库鲁-捷格列克铜金矿床成矿岩体 地球化学特征及其地质意义

李宇轩^{1,2}, 陈博³, 王斌^{3,*}, 安芳¹, Nikolai Pak⁴

(1. 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069; 2. 西安西北有色物化探总队有限公司, 陕西 西安 710068; 3. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 4. 吉尔吉斯国家科学院地质研究所, 吉尔吉斯斯坦 比什凯克 996312)

摘要: 库鲁-捷格列克铜金矿床位于中亚造山带中天山西段恰特卡尔构造带, 是吉尔吉斯斯坦境内的大型矽卡岩型铜金矿床。为了深入了解库鲁-捷格列克铜金矿床成矿岩体的岩浆性质和岩石成因, 笔者对成矿岩体开展了详细的岩相学和地球化学研究。研究结果显示, 成矿岩体为花岗闪长岩, 属于过铝质钙碱性 I 型花岗岩系列, 具有轻稀土相对重稀土富集 (La_N/Yb_N 值为 7.6~16.4)、无明显 Eu 和 Ce 异常 (δEu 值为 0.84~1.00; δCe 值为 1.04~1.05), Rb、Ba、Zr 和 Hf 相对富集, 而 U、Th、Sr、Nb、Ta 和 Nd 相对亏损的地球化学特征。花岗闪长岩中磷灰石轻稀土相对富集 (LREE/HREE 值为 3.42~17.15), 具有强 Eu 负异常 (δEu 值为 0.12~0.47), 无明显 Ce 异常; 锆石强烈富集重稀土 (LREE/HREE 值为 0.02~0.13), 大多呈强的负 Eu 异常和正 Ce 异常 (δEu 值为 0.03~0.31, δCe 值为 1.3~80.9)。磷灰石和锆石微量元素地球化学特征显示, 成矿岩浆的温度为 742~779°C, 并具有较高岩浆氧逸度 (ΔFMQ 集中于 0.4~3.9) 和 F ($1.466 \times 10^{-6} \sim 2.909 \times 10^{-6}$)、Cl ($548 \times 10^{-6} \sim 2.033 \times 10^{-6}$) 含量, 为 Cu-Au 成矿提供了有利的岩浆条件。库鲁-捷格列克铜金矿床可能为早石炭世晚期土耳其斯坦洋洋壳向北俯冲过程中, 地幔楔受俯冲板片组分交代部分熔融产生的高氧逸度、富挥发分 (F、Cl) 岩浆侵位于下石炭统多内昔组灰岩中, 经含矿岩浆热液与灰岩相互作用而形成。

关键词: 中天山; 库鲁-捷格列克铜金矿; 成矿岩体; 岩浆性质; 岩石成因

中图分类号: P618

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)01-0172-17

Geochemical Characteristics and Genesis of Intrusive Ore-Forming Rock Bodies in the Kuru-Tegerek Copper-Gold Deposit, Kyrgyzstan

收稿日期: 2024-04-03; 修回日期: 2024-06-27; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家重点研发计划项目课题“中亚成矿域战略性矿产信息及成矿规律”(2021YFC2901802), 国家自然科学基金项目“金堆城超大型斑岩铜矿原位 Fe 同位素研究: 对岩浆-热液系统中 Fe 同位素分馏机理的约束”(42273062), 新疆重大科技专项“新亚欧大陆桥经济走廊铜金稀土等战略矿产成矿预测与潜力评价”(2022A03010-2), 中国地质调查局项目“中亚和西亚国际合作地质调查工程”(DD20230128)联合资助。

作者简介: 李宇轩(1997-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学和矿床学专业。E-mail: 897277230@qq.com。

***通讯作者:** 王斌(1982-), 男, 高级工程师, 主要从事中亚地区矿产地质研究工作。E-mail: 305590518@qq.com。

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

LI Yuxuan^{1,2}, CHEN Bo³, WANG Bin^{3,*}, AN Fang¹, Nikolai Pak⁴

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;

2. Xi'an Northwest Non-ferrous Geophysical and Chemical Exploration Group Co., Ltd, Xi'an 710068, Shaanxi, China;

3. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 4. Geological Institute of the

National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek 996312, Kyrgyzstan)

Abstract: The Kuru-Tegerek copper-gold deposit is located in the Chatkal tectonic belt of the western segment of the Central Asian orogenic belt in Kyrgyzstan. It is a large skarn-type copper-gold deposit. In order to better understand the magmatic properties and petrogenesis of the ore-forming rock bodies in the Kuru-Tegerek copper-gold deposit, detailed petrographic and geochemical studies have been conducted on the ore-forming rock bodies in the mining area. The results show that the ore-forming rock bodies are granodiorites, belonging to the peraluminous calc-alkaline I-type granite series, with light rare earth elements enriched relative to heavy rare earth elements ($La_N/Yb_N = 7.6 \sim 16.4$), no significant Eu and Ce anomalies ($\delta Eu = 0.84 \sim 1.00$; $\delta Ce = 1.04 \sim 1.05$), and relatively enriched Rb, Ba, Zr, and Hf, while U, Th, Sr, Nb, Ta, and Nd are relatively depleted. The apatite in the granodiorite is enriched in light rare earth elements relative to heavy rare earth elements ($LREE/HREE = 3.42 \sim 17.15$), showing strong negative Eu anomalies ($\delta Eu = 0.12 \sim 0.47$) and no significant Ce anomalies; zircons are strongly enriched in heavy rare earth elements ($LREE/HREE = 0.02 \sim 0.13$), mostly showing strong negative Eu anomalies and positive Ce anomalies ($\delta Eu = 0.03 \sim 0.31$, $\delta Ce = 1.3 \sim 80.9$). The trace element geochemical characteristics of apatite and zircon indicate that the temperature of the ore-forming magma is about $742 \sim 779^\circ\text{C}$, with high magmatic oxygen fugacity ($\Delta FMQ = 0.4 \sim 3.9$) and high F ($1.466 \times 10^{-6} \sim 2.909 \times 10^{-6}$) and Cl ($548 \times 10^{-6} \sim 2033 \times 10^{-6}$) contents, providing favorable magmatic conditions for Cu-Au mineralization. The Kuru-Tegerek copper-gold deposit may have been formed during the late Early Carboniferous period when the Turkestan oceanic crust subducted northward, and the mantle wedge was partially melted by the metasomatic components of the subducting slab, resulting in high oxygen fugacity and volatile-rich (F, Cl) magma intrusion into the Lower Carboniferous Duoneixi Formation limestone. The interaction between the ore-bearing magmatic hydrothermal fluid and the limestone formed the deposit.

Keywords: Central Tianshan; Kuru-Tegerek Cu-Au deposit; metallogenic rock body; magma property; petrogenesis

中亚造山带天山成矿带发育多个世界级金、铜矿床, 类型包括造山型、斑岩型、浅成低温热液型和矽卡岩型等(Zu et al., 2019; 曹积飞等, 2023)。位于中天山西段塔纳斯-费尔干纳深断裂西南侧的恰特卡尔-库拉玛构造带是域内重要的斑岩型、矽卡岩型 Cu-Au 矿床成矿带(图 1), 库鲁-捷格列克铜金矿床位于该成矿带东端(刘春涌, 2005), 是吉尔吉斯斯坦境内具有重要经济意义的大型矽卡岩型铜金矿床(Soloviev et al., 2018; 吕鹏瑞, 2021, 2022)。库鲁-捷格列克铜金矿床产于下石炭统多内昔组灰岩与早石炭世晚期侵入岩的接触带内, 是岩浆-热液活动与构造共同作用的产物, 矿体受褶皱、断裂以及密集的裂隙系统和破碎带所控制, 表现出明显的多期多阶段性(刘春涌, 2005;

Zu et al., 2019; 李平等, 2024)。截至目前, 前人已对该矿床的地质特征、成矿地质背景、成矿年代和矿床成因开展了研究, 认为库鲁-捷格列克铜金矿床的成矿年龄约为 325 Ma(锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (326 ± 3) Ma, 辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (323 ± 2) Ma(Zu et al., 2019), 与矿区出露的钙碱性侵入岩具有密切的成因联系(Soloviev et al., 2018)。然而, 对成矿岩体岩浆性质、岩浆成因及其成矿有利性的研究依然相对薄弱, 制约了对库鲁-捷格列克铜金矿床成矿作用的深入认识, 也在一定程度上阻碍了完善矿区和区域成矿模型的进展。因此, 笔者在前人研究工作的基础上, 选取库鲁-捷格列克铜金矿床与矿化相关的侵入岩体为研究对象, 通过成矿岩体岩相学、全岩主微量元素地球

斑岩-矽卡岩型 Cu-Au 矿床成矿关系密切; 第四期为 295 Ma 形成的规模较小的斜长花岗岩岩株, 影响了 Kouchbulak 浅成低温热液型金矿床的发育(图 1; Seltmann et al., 2011, 2014; Dolgoplova et al., 2017)。

库鲁-捷格列克铜金矿位于恰尔卡特成矿带的东北部, 是区内最大的矽卡岩型 Cu-Au 矿床(图 1), 其中主要的成矿阶段为: 早期钙镁质进矽卡岩阶段; 铜-金-钼矿化的退矽卡岩阶段; 脉型铜-钼矿化的英云闪长斑岩阶段和浅部金矿化的石英-硫化物阶段(刘春涌, 2005; Soloviev et al., 2018; Zu et al., 2019; 李平等, 2024)。矿区出露地层为下石炭统多内昔组灰岩、白云岩等, 被中酸性岩株状岩体所侵位, 该岩体是散达拉石岩体的组成部分, 总体走向北东, 平面上呈不规则状, 边界复杂多变, 与矽卡岩和铜金矿体表现出明显的关联

(图 2)。矽卡岩分布于侵入体与灰岩、白云岩、大理岩的接触带, 发育辉石、石榴子石等矽卡岩矿物(Soloviev et al., 2018)。铜金矿体赋存于内部结构复杂的矽卡岩带内, 呈带状、层状和透镜状沿环形接触带断续分布, 根据矿体空间分布位置, 将其划分为南矿带、北东矿带、北西矿带(图 2)。矿区发育绢英岩化、青磐岩化和钾化等热液蚀变, 其中绢英岩化与铜金矿化关系最密切(Soloviev et al., 2018)。原生矿石呈浸染状构造、块状构造和网脉状构造, 以充填交代结构和粒状结构为主, 脉石矿物有石榴子石、透辉石、阳起石、石英、含铁碳酸盐矿物、方解石等(Soloviev et al., 2018), 矿石矿物有黄铁矿、黄铜矿、毒砂、辉钼矿、闪锌矿、自然金和银金矿等, 辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (323 ± 2) Ma(Zu et al., 2019)。

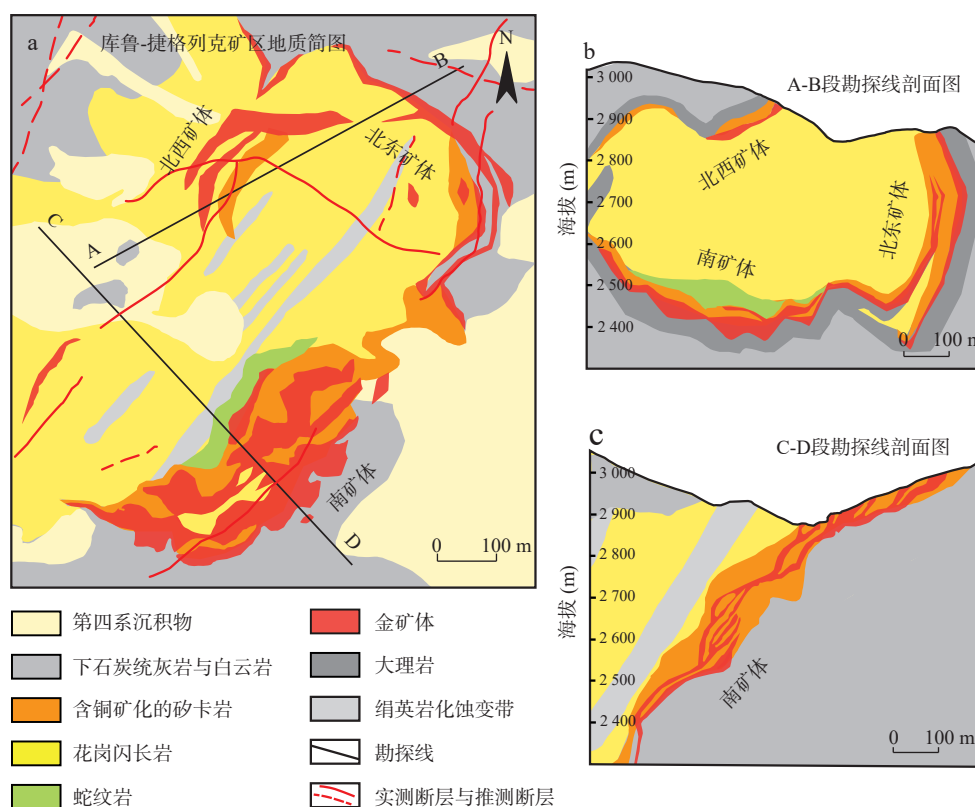


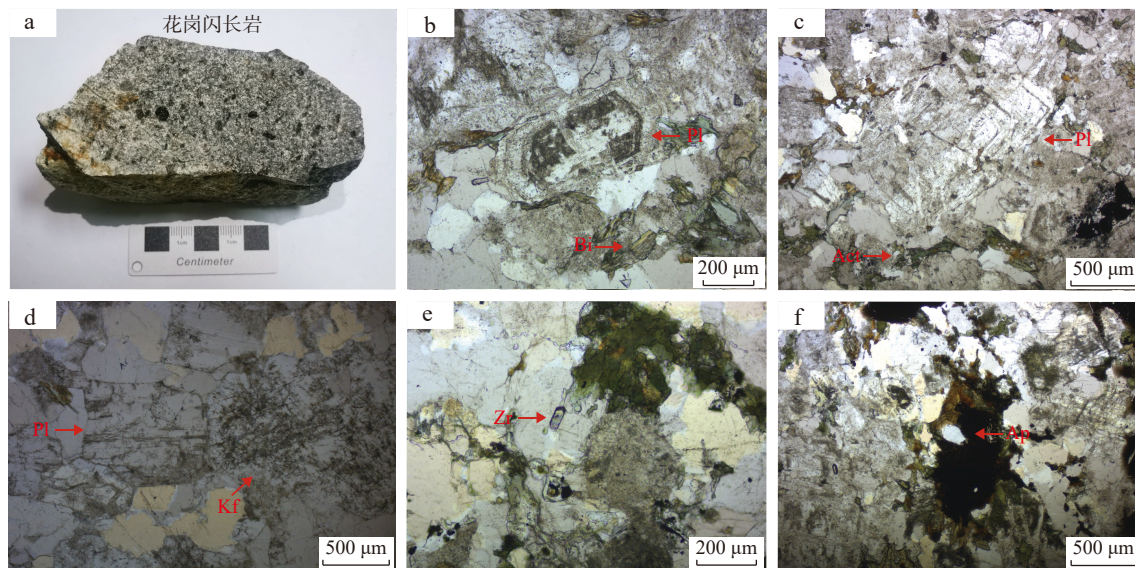
图2 库鲁-捷格列克矿区地质简图(a)和地质剖面图(b,c; 刘春涌, 2005; Soloviev et al., 2018)

Fig. 2 (a) Geological sketch and (b, c) geological profile of Kuru-Tegerek mining area

2 成矿岩体岩石学特征

样品采自库鲁-捷格列克铜金矿床北西矿带 2 800 m 中段, 主要为与矿化有关的侵入岩。样品手标本呈灰白色-浅灰绿色(图 3a), 斑状构造, 主要矿物为斜长石、

角闪石、少量钾长石、黑云母和石英。显微镜下观察显示, 斜长石呈自形-半自形柱状结构, 是主要的斑晶矿物, 含量约为 50%~60%, 粒径为 0.5~2 mm, 发育环带构造, 有明显绢云母化蚀变, 导致晶体呈污浊状(图 3b、图 3c); 角闪石大多被蚀变为阳起石, 但部分保留了角闪石假象, 预估其占矿物总含量的 10%, 粒



a.手标本照片; b.斜长石与黑云母; c.斜长石与阳起石; d.斜长石与钾长石; e.锆石; f.磷灰石; Pl.斜长石; Bi.黑云母, Act.阳起石; Kf.钾长石; Zr.锆石; Ap.磷灰石

图3 库鲁-捷格列克花岗闪长岩手标本及显微镜下特征矿物照片

Fig. 3 Photograph of hand specimens and microphotographs of typical minerals of the Kuru-Tegerek granodiorite

径为 0.7~2 mm; 石英在显微镜下呈无色透明, 自形—半自形粒状结构, 含量约为 10%~20%, 粒径约为 0.1~1 mm; 钾长石具有阶梯状解理, 半自形—他形结构, 约占矿物含量的 10%~15%; 黑云母镜下呈棕褐色, 部分绿泥石化明显, 约占矿物总含量的 5%(图 3b、图 3d)。岩石中的副矿物有磷灰石、榍石和锆石等, 多呈细粒自形晶结构(图 3e、图 3f)。基于矿物组成和含量, 初步认为库鲁-捷格列克铜金矿区成矿岩体岩性为花岗闪长岩。

3 实验方法

在手标本和显微镜观察基础上, 挑选了 6 件具有代表性的成矿岩体样品进行主微量元素地球化学分析。取新鲜岩体样品, 用清水洗净晾干, 随后进行样品烘干, 用不锈钢捣钵破碎至 1~2 mm 以下, 再用无污染钵振动碾磨至 200 目, 待分析。测试工作在广州澳实分析检测中心(ALS minerals-ALS chemax)完成, 主量元素定量分析仪器为 PANalytical PW 2424 X 射线荧光光谱仪(XRF), 测试精度优于 1%; 微量、稀土元素的测试仪器分别为 Perkin Elmer Elan 9000 与 Agilent VISTA 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS), 测试精度优于 5%。

根据显微镜综合观察结果, 在薄片(19KL-01、19KL-04)中圈定磷灰石和锆石副矿物开展阴极发光(CL)及背散射(BSE)成像研究, 并在此基础上在武汉上谱分析科技有限公司开展了原位主量和微量元素

地球化学分析。主量元素分析工作利用电子探针完成, 仪器型号为 JEOL JXA-8230, 由于磷灰石中 F、Cl、Ca 等元素相对不稳定, 本次实验分析采用较低强度的电压电流(15 kV、10 nA), 束斑直径为 10 μm, 校正标样为 SPI 公司提供的磷灰石(Ca、P)、硬玉(Na、Si)、镁橄榄石(Mg)、赤铁矿(Fe)、蔷薇辉石(Mn)、金云母(F)和硅铍铝钠石(Cl), 数据采用日本电子(JEOL)的 ZAF 校正方法进行修正。矿物微区原位微量元素分析利用 LA-ICP-MS 完成, 激光剥蚀系统由 COMPex-Pro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 Micro Las 光学系统组成, ICP-MS 型号为 Agilent 7900, 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(Hu et al., 2015), 详细仪器参数和分析流程见 Zong et al. (2017)。本次分析的激光剥蚀束斑为 32 μm、频率为 4 Hz, 采用玻璃标准物质 BHVO-2G、BCR-2G 和 BIR-1G 进行多外标无内标校正, 数据处理采用软件 ICP MS Data Cal 完成(Liu et al., 2008)。

4 测试结果

4.1 全岩地球化学

全岩主量元素分析结果显示(表 1), 库鲁-捷格列克铜金矿床成矿岩体中 SiO₂ 含量变化较大, 介于 56.35%~75.54%; Na₂O 含量相对集中, 为 2.03%~3.01%; K₂O 含量为 0.48%~2.16%, 明显低于 Na₂O。

表 1 库鲁-捷格列克矿区侵入岩主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果Tab. 1 Analysis results of major elements (%) and trace elements (10^{-6}) of intrusive rocks in the Kuru-Tegerek mining area

样品号	19KL-01	19KL-02	19KL-03	19KL-04	19KL-05	19KL-06
SiO ₂	71.69	72.79	75.54	69.24	56.35	63.48
TiO ₂	0.31	0.29	0.23	0.36	1.04	0.49
Al ₂ O ₃	12.59	11.84	8.53	14.00	16.34	17.46
TFe ₂ O ₃	5.20	5.07	6.46	5.29	7.51	5.63
MnO	0.06	0.06	0.05	0.06	0.18	0.09
MgO	1.33	1.25	0.92	1.45	4.48	1.86
CaO	4.03	3.65	1.80	4.12	7.19	5.36
Na ₂ O	2.78	2.58	2.03	2.99	2.57	3.01
K ₂ O	0.70	0.68	0.48	0.85	2.16	1.40
P ₂ O ₅	0.11	0.11	0.08	0.13	0.36	0.16
Mg#	31.31	30.53	20.25	32.82	51.54	37.06
LOI	1.47	1.38	2.43	1.73	2.33	1.77
Total	100.27	99.70	98.55	100.22	100.51	100.71
Na ₂ O+K ₂ O	3.48	3.26	2.51	3.84	4.73	4.41
σ	0.42	0.36	0.19	0.56	1.68	0.95
A/CNK	1.68	1.71	1.98	1.76	1.37	1.79
Rb	16.5	16.1	11.4	20.9	155.5	36.4
Ba	332	332	199	396	709	541
Th	3.66	3.04	1.85	2.86	11.9	6.02
U	0.45	0.43	0.29	0.49	3.48	0.7
K	4 649	4 566	3 238	5 728	14 361	9 380
Ta	0.60	0.60	0.40	0.70	1.10	0.70
Nb	6.70	6.20	3.70	7.60	15.90	9.10
La	22.9	16.0	12.0	17.8	46.4	48.1
Ce	44.3	32.0	23.6	36.5	92.8	87.1
Sr	269	260	173	299	483	332
Nd	16.7	12.7	9.30	15.0	37.6	30.1
P	480	470	370	560	1 450	670
Zr	108	99.0	72.0	125	248	165
Hf	2.70	2.40	1.70	3.00	5.80	4.00
Sm	2.87	2.38	1.68	2.81	6.69	4.73
Ti	1 109	1 043	797	1 271	3 495	1 727
Y	15.4	14.3	9.90	16.8	23.7	22.3
Yb	1.55	1.45	1.04	1.68	2.03	2.18
Lu	0.27	0.23	0.17	0.27	0.32	0.35
La	22.9	16.0	12.0	17.8	46.4	48.1
Ce	44.3	32.0	23.6	36.5	92.8	87.1
Pr	4.68	3.50	2.53	4.07	10.3	8.64
Nd	16.7	12.7	9.30	15.0	37.6	30.1
Sm	2.87	2.38	1.68	2.81	6.69	4.73
Eu	0.90	0.76	0.52	0.89	1.88	1.20
Gd	2.64	2.25	1.63	2.70	5.25	4.04
Tb	0.40	0.36	0.26	0.42	0.75	0.61
Dy	2.50	2.28	1.58	2.61	4.27	3.68

续表 1

样品号	19KL-01	19KL-02	19KL-03	19KL-04	19KL-05	19KL-06
Ho	0.52	0.48	0.34	0.56	0.84	0.77
Er	1.57	1.44	1.05	1.70	2.30	2.26
Tm	0.23	0.22	0.15	0.26	0.32	0.32
Yb	1.55	1.45	1.04	1.68	2.03	2.18
Lu	0.27	0.23	0.17	0.27	0.32	0.35
Y	15.4	14.3	9.90	16.8	23.7	22.3
ΣREE	102	76.1	55.9	87.3	212	194
LREE	92.4	67.3	49.6	77.1	196	180
HREE	9.68	8.71	6.22	10.2	16.1	14.2
LREE/HREE	9.54	7.73	7.98	7.56	12.2	12.7
δEu	1.00	1.00	0.96	0.99	0.97	0.84
δCe	1.05	1.05	1.05	1.05	1.04	1.05
(La/Yb) _N	10.6	7.92	8.28	7.60	16.4	15.8
(La/Sm) _N	7.98	6.72	7.14	6.33	6.94	10.2

注： $\sigma = \frac{(K_2O+Na_2O)^2}{SiO_2-43}$ ； $A/CNK = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3+K_2O+CaO}$ ； $\delta Eu = \frac{Eu_N}{\sqrt{Sm_N \times Gd_N}}$ ； $\delta Ce = \frac{Ce_N}{\sqrt{La_N \times Pr_N}}$ ；N代表球粒陨石标准化数值。

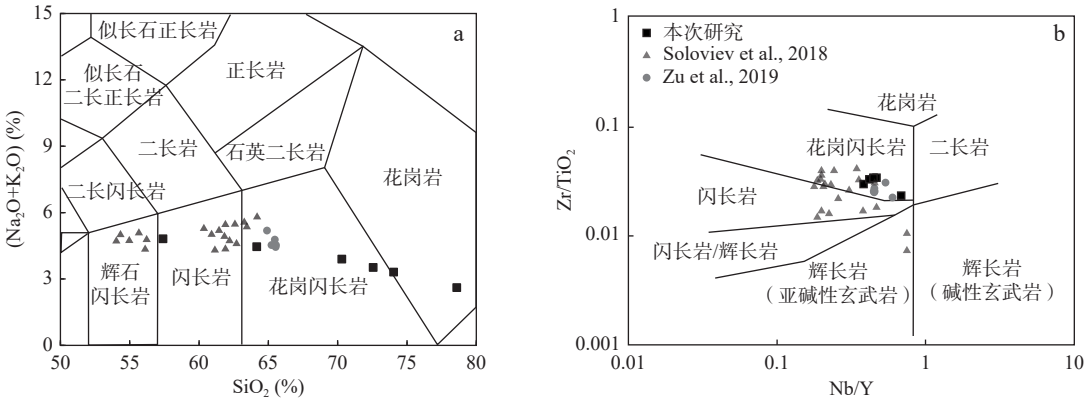
Na₂O+K₂O 含量为 2.51%~4.73%；Al₂O₃ 含量为 8.53%~17.46%；CaO 含量为 1.80%~7.19%；另含少量 P₂O₅ (0.08%~0.36%)。里特曼指数 σ 值为 0.19~1.68，小于 3.3，显示钙碱性的特征；A/CNK 指数为 1.37~1.98，反映为过铝质花岗岩(刘洪等, 2016; 吕鹏瑞等, 2017)。在 TAS 图解中，由于 SiO₂ 含量变化较大，6 组数据落入从闪长岩、花岗闪长岩到花岗岩的较大变化范围内(图 4a)。结合镜下观察，推测成矿流体叠加所造成的不同程度硅化，是导致样品 SiO₂ 含量变化较大的主要原因。为避免蚀变作用在岩石分类中产生的影响，笔者选择地球化学性质相对稳定的高场强元素(Ti、Nb、Zr)对样品进行分类研究，在 Zr/TiO₂-Nb/Y 图中，所有

样品均落在花岗闪长岩区域(图 4b)，与岩相学观察结果基本一致。

样品的微量元素分析结果表明(表 1)，其微量元素组成特征相似。在原始地幔标准化蛛网图解中，呈现出 Rb、Ba、La、Ce、Zr 和 Hf 相对富集，Nb、Ta、P 和 Ti 相对亏损的特征(图 5a)；球粒陨石标准化稀土元素配分模式总体趋势相近，呈平缓右倾型(图 5b)，稀土总量(ΣREE)为 55.85×10⁻⁶~211.85×10⁻⁶，轻稀土相对重稀土富集，(La/Yb)_N 值为 7.6~16.4、无明显 Eu 和 Ce 异常(δEu 值为 0.84~1.00，δCe 值为 1.04~1.05)。

4.2 磷灰石矿物学和地球化学

作为侵入岩中一种常见的副矿物，磷灰石可容纳



a. 底图据 Middlemost (1994)；b. 底图据 Winchester et al. (1976)

图4 库鲁-捷格列克成矿岩体样品 TAS 图解(a)和 Zr/TiO₂-Nb/Y 成分分类图(b)

Fig. 4 (a) TAS diagram and (b) Zr/TiO₂-Nb/Y composition classification diagram of Kuru-Tegerek metallogenic rock mass samples

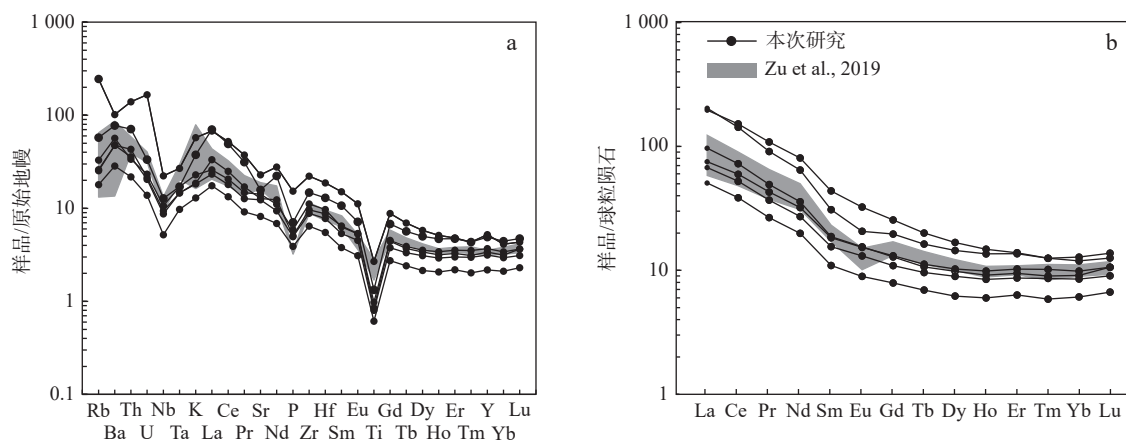


图5 库鲁-捷格列克成矿岩体样品原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)与球粒陨石标准化稀土配分图(b; 标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 5 (a) Normalized trace element spider diagram and (b) chondrite normalized REE distribution diagram of the original mantle of the Kuru-Tegerek metallogenic rock mass sample

多种微量元素, 且物理化学性质稳定(Белоусова et al., 2002; Mao et al., 2016), 能够记录岩浆的年龄、温度、氧逸度、含水量、挥发分等信息, 是岩浆-热液成矿过程信息的良好载体(李华伟等, 2023)。库鲁-捷格列克花岗闪长岩中磷灰石较常见, 粒径为 30~200 μm 不等, 呈自形-半自形晶结构, 通常被斜长石、黑云母、阳起石等矿物包裹(图 3f)。大部分磷灰石颗粒的 CL 图像比较均一, 仅个别发育细小热液蚀变边(图 6a)。背散射图像显示, 磷灰石颗粒内部成分均匀, 不含矿物包裹体(图 6b), 符合典型的岩浆成因磷灰石特征(Harlov, 2015; Webster et al., 2015)。

库鲁-捷格列克成矿有关花岗闪长岩中磷灰石 P_2O_5 含量为 40.75%~42.26%, CaO 含量变化范围为 54.68%~56.67%。此外, 含少量 SiO_2 (0.09%~0.38%)、

FeO (0.02%~0.32%) 和 MnO (0.03%~0.16%), 而 Na_2O 、 MgO 和 SO_3 的含量均低于 0.01%; 挥发性组分 F 含量为 1.77%~2.64%, Cl 含量为 0.14%~0.52%, Cl/F 值为 0.062~0.291(表 2)。原位微量元素分析结果显示, 磷灰石稀土总量为 $4\,020\times 10^{-6}\sim 8\,153\times 10^{-6}$, 轻稀土相对重稀土富集(LREE/HREE 值为 3.42~17.15), 在球粒陨石标准化稀土配分模式图中呈右倾趋势, 表现为强 Eu 负异常(δEu 值为 0.12~0.47), 无明显 Ce 异常(图 6c; 表 3)。

4.3 锆石矿物学和地球化学

锆石和磷灰石一样, 同为岩浆-热液矿床中常见的副矿物, 化学性质稳定, 能够很好地对岩浆作用及成矿过程进行记录(Ballard et al., 2002; Piccoli et al., 2002; 李华伟等, 2023)。库鲁-捷格列克花岗闪长岩中

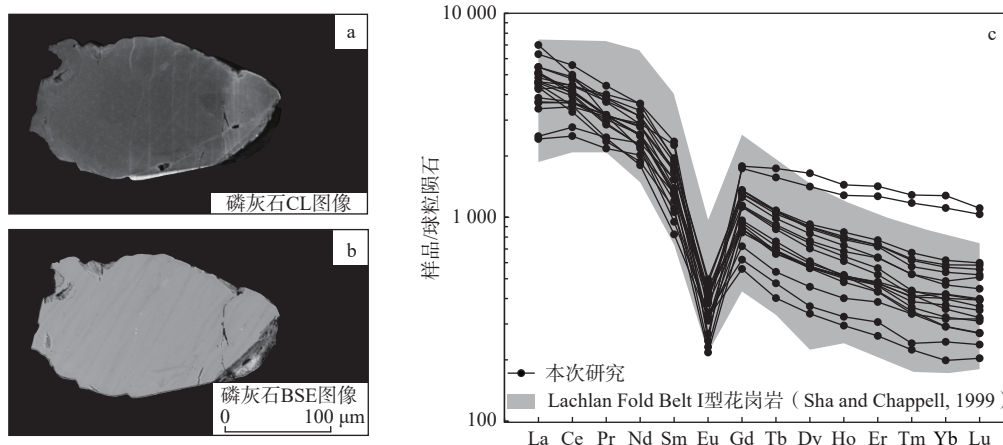


图6 磷灰石 CL(a)、BSE 图像(b)及稀土元素配分图(c)

Fig. 6 (a) CL, (b) BSE image and (c) REE distribution diagram of Apatite

表 2 库鲁-捷格列克花岗闪长岩中典型磷灰石的主量元素(%)分析结果

Tab. 2 Major element(%) analysis results of typical apatite grains in Kuru-Tegerek granodiorite

样品号	P ₂ O ₅	CaO	MgO	SO ₃	MnO	FeO	Na ₂ O	SiO ₂	F	Cl	Total	Cl/F	XF	XCl	XOH
19KL-01-4	41.56	54.73	—	0.09	0.13	0.32	0.05	0.09	1.78	0.52	99.27	0.29	0.48	0.07	0.45
19KL-01-1	41.20	55.40	—	0.03	0.08	0.16	0.04	0.28	2.17	0.23	99.58	0.11	0.58	0.03	0.39
19KL-01-3	42.26	55.38	0.01	0.04	0.07	0.11	—	0.22	2.23	0.14	100.45	0.06	0.59	0.02	0.39
19KL-01-9	40.88	55.18	—	—	0.16	0.04	0.02	0.27	2.39	0.45	99.38	0.19	0.64	0.06	0.30
19KL-01-8	41.88	54.68	—	0.03	0.03	0.16	—	0.32	2.03	0.32	99.44	0.16	0.54	0.05	0.41
19KL-01-7	41.61	55.84	—	0.03	0.04	0.27	0.05	0.21	1.77	0.26	100.08	0.14	0.47	0.04	0.50
19KL-01-10	40.75	56.67	—	0.02	—	0.08	0.02	0.29	2.35	0.18	100.36	0.08	0.62	0.03	0.35
19KL-04-1	41.21	55.55	0.01	0.04	0.15	0.07	—	0.38	2.16	0.26	99.84	0.12	0.57	0.04	0.39
19KL-04-2	41.32	55.49	—	—	0.06	0.16	0.03	0.28	2.49	0.46	100.29	0.18	0.66	0.07	0.27
19KL-04-3	41.85	55.01	0.01	0.04	0.12	0.03	0.11	0.24	2.30	0.35	100.04	0.15	0.61	0.05	0.34
19KL-04-5	41.55	55.82	—	—	0.12	0.06	0.03	0.14	2.07	0.27	100.05	0.13	0.55	0.04	0.42
19KL-04-7	41.74	55.12	0.01	0.02	0.11	0.07	0.03	0.18	2.64	0.26	100.16	0.10	0.70	0.04	0.26
19KL-04-11	40.87	55.97	—	0.02	0.08	0.02	0.05	0.28	2.30	0.23	99.82	0.10	0.61	0.03	0.36
19KL-04-12	41.39	55.65	—	0.03	0.08	0.15	0.04	0.19	2.15	0.26	99.94	0.12	0.57	0.04	0.39
19KL-04-13	41.12	55.26	0.01	0.04	0.14	0.03	0.06	0.22	2.24	0.27	99.39	0.12	0.60	0.04	0.36
19KL-04-14	41.77	55.03	0.01	0.04	0.08	0.07	0.06	0.28	2.22	0.37	99.91	0.17	0.59	0.05	0.36
19KL-04-4	41.24	55.55	0.02	0.03	0.11	0.14	—	0.35	2.08	0.22	99.72	0.11	0.55	0.03	0.42
19KL-04-10	41.76	55.31	—	0.01	0.13	0.20	0.03	0.25	2.12	0.24	100.04	0.11	0.56	0.03	0.40
19KL-04-8	41.65	55.73	—	—	—	0.05	0.02	0.28	1.99	0.16	99.89	0.08	0.53	0.02	0.45
19KL-04-9	42.07	55.43	—	0.03	0.12	0.27	0.03	0.19	2.36	0.26	100.76	0.11	0.62	0.04	0.34

注：—代表含量低于检出限。

锆石含量较低, 粒径通常低于 100 μm(图 3e), 多呈自形粒状结构, CL 图像中存在明显的韵律环带, 无核幔边结构(图 7a)。本次研究对花岗闪长岩中 5 颗锆石进行了原位微量元素分析, 锆石稀土总量变化范围为 $281 \times 10^{-6} \sim 1\,350 \times 10^{-6}$, 在球粒陨石标准化稀土配分模式图中, 轻重稀土分异明显, 重稀土强烈富集(LREE/HREE 值为 0.02~0.13), 大多具有强负 Eu 异常和正 Ce 异常(δEu 值为 0.03~0.31, δCe 值为 1.3~80.9)(表 4, 图 7b)。

5 讨论

5.1 岩浆性质

岩浆的组分、温度及氧化还原状态等因素对 Cu、Au 等亲硫元素的富集具有控制作用, 一般认为偏氧化性岩浆能更容易将亲硫金属元素从地幔携带至地壳浅部, 从而有利于金属矿床的形成(Hattori et al.,

2001; Sillitoe, 2010)。在研究岩浆类型及其相关成矿过程时, 岩浆温度是重要的物理参数之一, 如 A 型花岗岩的形成常与幔源岩浆相关, 其岩浆温度相对较高, 通常为 800~900 °C(King et al., 2001)。锆石 Zr 饱和温度能够对岩浆温度提供简单而有效的估算(Watson et al., 1983; Miller et al., 2003)。

$$T_{Zr} (^{\circ}\text{C}) = \frac{12\,900}{\left[2.95 + 0.85M + \ln\left(\frac{496\,000}{Zr_{melt}}\right) - 273\right]}$$
$$M = \frac{Na + K + 2Ca}{(Al \times Si)} \tag{1}$$

式中: 数值为全岩 Si、Al、Ca、Na、K 元素阳离子数归一化后各元素的阳离子数。通过以上公式计算获得, 库鲁-捷格列克花岗闪长岩的形成温度为 742~779 °C。

磷灰石地球化学组成可以保存原始的岩浆信息, 其中, Mn、Ga、Eu 和 Ce 等元素常被用来讨论岩浆的

表 3 库鲁-捷格列克花岗闪长岩中典型磷灰石的微量元素(10^{-6})分析结果

Tab. 3 Trace element (10^{-6}) analysis results of typical apatite grains in Kuru-Tegerek granodiorite

样品号	19KL-01						19KL-04											
测点号	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
La	1 218	574	592	1 098	1 067	1 094	1 146	1 656	808	1 495	1 292	1 028	873	913	864	1 193	1 008	1 081
Ce	2 543	1 532	1 692	2 507	2 160	2 724	2 705	3 057	2 130	3 411	2 985	2 011	2 232	2 256	2 234	2 560	2 681	2 408
Pr	299	207	234	298	232	367	353	300	297	419	365	224	301	302	287	302	380	270
Nd	1 190	943	1 082	1 186	841	1 560	1 466	1 015	1 347	1 677	1 456	876	1 297	1 312	1 190	1 169	1 688	1 053
Sm	207	202	236	201	126	299	284	145	346	292	255	169	257	265	234	197	360	184
Eu	25.0	13.4	15.6	24.1	18.8	27.6	23.6	19.8	14.3	28.8	25.6	12.6	22.7	22.9	18.0	22.0	19.5	18.3
Gd	193	199	231	188	115	277	280	127	366	268	235	173	258	269	233	180	357	180
Tb	27.0	28.4	32.7	25.5	15.0	40.1	40.4	17.7	65.0	38.9	34.4	25.7	36.9	39.9	33.6	24.9	58.7	25.8
Dy	151	155	178	144	85.5	229	235	93.0	418	227	195	143	211	223	190	144	359	147
Ho	29.5	29.2	34.5	28.4	16.7	45.6	47.9	18.4	81.6	44.7	38.5	27.2	41.2	44.0	36.5	29.3	72.5	28.8
Er	76.5	71.9	86.6	77.1	43.4	121	128	50.7	235	122	105	71.4	105	119	93.1	79.1	210	78.3
Tm	9.23	8.86	10.6	9.85	5.71	15.7	17.1	6.15	32.8	15.9	13.4	8.60	13.4	14.6	11.2	10.4	30.0	10.5
Yb	55.1	49.6	60.4	63.2	33.8	96.7	105	41.6	217	99.5	82.8	49.4	79.3	91.5	67.7	68.1	189	71.4
Lu	7.87	6.89	8.19	8.89	5.17	14.1	15.2	6.04	28.2	14.8	12.9	6.86	11.3	13.3	9.28	9.99	26.3	10.1
Th	59.3	10.4	15.9	54.2	38.8	69.7	34.6	57.1	20.0	90.8	76.8	16.0	42.9	41.9	18.5	42.2	52.8	31.5
Sr	298	296	276	294	286	294	252	287	213	282	278	271	274	266	254	279	217	268
MnO	0.10	0.16	0.15	0.09	0.10	0.09	0.13	0.11	0.14	0.12	0.11	0.14	0.09	0.10	0.13	0.11	0.11	0.16
ΣREE	6 032	4 020	4 494	5 859	4 765	6 909	6 844	6 555	6 386	8 153	7 094	4 825	5 739	5 885	5 501	5 988	7 440	5 565
LREE	5 482	3 472	3 852	5 315	4 445	6 070	5 976	6 194	4 942	7 323	6 378	4 321	4 983	5 070	4 827	5 442	6 138	5 014
HREE	550	548	643	545	320	839	868	361	1 444	830	716	505	756	815	674	546	1 303	551
La _N /Yb _N	15.9	8.30	7.03	12.5	22.6	8.11	7.85	28.5	2.67	10.8	11.2	14.9	7.90	7.16	9.16	12.6	3.83	10.9
δEu	0.38	0.20	0.20	0.37	0.47	0.29	0.25	0.43	0.12	0.31	0.31	0.22	0.27	0.26	0.23	0.35	0.16	0.30
δCe	1.00	1.09	1.11	1.05	1.02	1.05	1.03	0.98	1.07	1.04	1.05	0.98	1.06	1.05	1.09	1.02	1.06	1.06
LREE/HREE	9.98	6.33	5.99	9.75	13.9	7.24	6.89	17.2	3.42	8.82	8.90	8.56	6.59	6.22	7.17	9.97	4.71	9.10

注: -代表含量低于检出限。

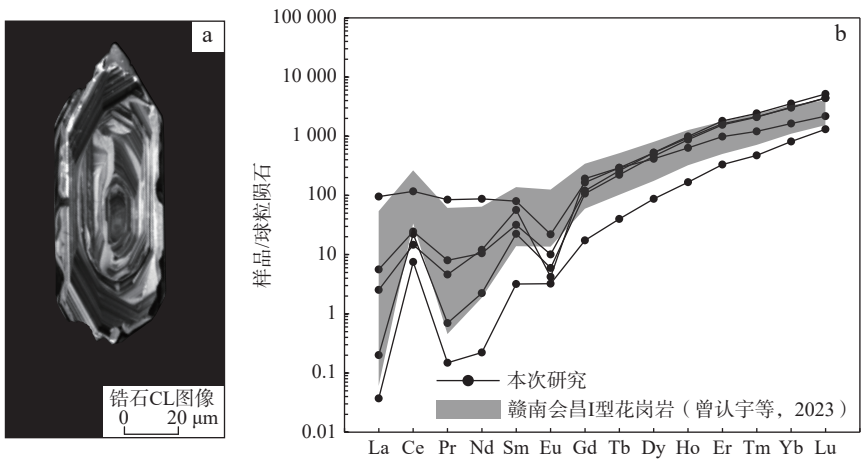


图7 锆石 CL 图像(a)及稀土元素配分图(b)

Fig. 7 (a) Zircon CL image and (b) REE distribution diagram

表 4 库鲁-捷格列克花岗闪长岩中典型锆石颗粒
微量元素(10^{-6})分析结果

Tab. 4 Trace element(10^{-6}) compositions of zircon grains in
Kuru-Tegerek granodiorite

样品号	19KL-01			19KL-04	
测点号	1	2	3	1	2
La	0.01	1.33	22.6	0.05	0.60
Ce	4.60	15.0	71.4	13.7	8.95
Pr	0.01	0.76	8.04	0.07	0.44
Nd	0.10	4.91	40.8	1.04	5.62
Sm	0.49	4.88	12.3	3.43	8.70
Eu	0.19	0.58	1.28	0.34	0.24
Gd	3.57	24.7	33.8	22.0	39.5
Tb	1.50	9.76	10.9	8.34	10.9
Dy	22.2	135	133	116	105
Ho	9.48	56.0	53.0	49.5	35.9
Er	55.0	301	269	258	163
Tm	12.1	61.8	54.5	53.5	30.9
Yb	138	603	515	525	278
Lu	33.4	131	113	111	55.5
Ti	4.74	8.92	5.13	3.89	50.6
U	37.9	148	144	159	530
ΣREE	281	1 350	1 338	1 163	744
LREE	5.40	27.4	156	18.6	24.6
HREE	275	1 322	1 182	1 144	719
δEu	0.31	0.13	0.18	0.09	0.03
δCe	80.9	3.60	1.30	49.9	4.09
LREE/HREE	0.02	0.02	0.13	0.02	0.03

注: -代表含量低于检出限。

氧化还原状态(Drake, 1975; Peng et al., 1997; Sha et al., 1999; Pan et al., 2016; Sun et al., 2019)。Mn、Ga、Eu、Ce 都是变价元素,在高氧逸度岩浆环境中会被氧化成高价态的 Mn^{4+} 、 Ga^{3+} 、 Eu^{3+} 、 Ce^{4+} ,而 Mn^{2+} 、 Ga^{2+} 、 Eu^{3+} 、 Ce^{3+} 则更倾向于进入磷灰石(Shannon, 1976; Sha et al., 1999; Белоусова et al., 2002),高氧逸度岩浆环境中结晶出的磷灰石具有更低的 Mn、Ga、Ce 含量和相对较高的 Eu 含量,而较低岩浆氧逸度环境下刚好相反。库鲁-捷格列克花岗闪长岩中磷灰石样品的 MnO 平均含量为 0.12%, Ga、Ce 和 Eu 的平均含量分别为 17.9×10^{-6} 、 2434.9×10^{-6} 和 20.7×10^{-6} ,对比具有较高岩浆氧逸度的滇西普朗斑岩与姚安斑岩磷灰石化学数据发现它们具有相似性(邢凯等, 2018; 郑瑜林等, 2021)。但岩浆的氧化状态可能受到多种因素的影响,不宜使用磷灰石中单一的元素来评判岩浆氧化状态。磷灰

石中 Ce 和 Eu 这两个具有相反配分行为的元素相结合可以指示岩浆的氧化还原状态(Ballard et al., 2002; Bi et al., 2002; Buick et al., 2007),在低氧逸度条件下,进入磷灰石晶体的 Eu^{3+} 含量降低而 Ce^{3+} 含量增加,从而出现负 Eu 异常和正 Ce 异常,且负 Eu 异常程度越高,氧逸度越低(Sha et al., 1999)。库鲁-捷格列克花岗闪长岩中磷灰石具有中等负 Eu 异常(δEu 值为 0.12~0.47),并且呈现微弱正 Ce 异常(δCe 值为 0.98~1.11), δEu 和 δCe 呈负相关关系(图 8a),暗示岩浆可能形成于中等偏高的氧逸度环境(Pan et al., 2016)。近年来,利用锆石微量元素和稀土元素计算氧逸度的方法不断被开发利用(张京渤等, 2018)。其中, Loucks 等(2020)对来自不同成分岩浆共 1 042 个锆石微量元素数据进行回归分析,并提出锆石 Ce-U-Ti 岩浆氧逸度计。

$$\log f_{O_2}(\text{sample}) - \log f_{O_2}(FMQ) = 3.99_8(\pm 0.12_4) \times \log \left(\frac{Ce}{\sqrt{U_i \times Ti}} \right) + 2.28_4(\pm 0.10_1) \\ U_i = U_{\text{测}} \times e^{t \cdot (1.98173 \times 10^{-4})} \quad (2)$$

等式左边 $\log f_{O_2}(\text{sample}) - \log f_{O_2}(FMQ)$ 表示样品氧逸度相对于铁橄榄石-磁铁矿-石英(FMQ)缓冲剂的值(ΔFMQ),等式右边是锆石的 Ce 和 Ti 含量(10^{-6}),而 U_i 代表锆石结晶时 U 的含量,其中 $U_{\text{测}}$ 为锆石 U 含量测试值, t 是锆石结晶年龄,单位为百万年。通过以上公式计算得出库鲁-捷格列克花岗闪长岩的 ΔFMQ 平均值分别为: 0.37、0.68、3.90、1.19 和 -2.81; 结合锆石 Zr 饱和温度数据,计算得出每个样品的 $\log f_{O_2}$ 值分别为 -15.23、-14.92、-11.70、-14.09 和 -18.09,在 $\log f_{O_2}$ -温度图中,多数样品在 FMQ 缓冲剂线之上(图 8b),进一步表明岩浆具有较高氧化性。

F 和 Cl 是岩浆中重要的挥发分元素,通常被认为在岩浆-热液演化过程中对成矿元素的迁移与富集起着重要作用(Zhang et al., 2022)。熔(流)体包裹体和磷灰石是目前常用的示踪熔体中挥发分含量的工具, Li et al. (2017)提出了利用磷灰石电子探针成分估算平衡熔体中 F、Cl 含量的方法。

$$C_F^{\text{melt}}(\text{ppm}) = 10\,000 \times 6.18 \times \frac{X_F^{Ap}}{X_{OH}^{Ap}} \div \left(e^{[40.33 + (X_F^{Ap} - X_{OH}^{Ap}) \times 21.29 + (-3.96) X_{Cl}^{Ap}] \times \frac{1000}{T + 273.15}} \right) \quad (3)$$

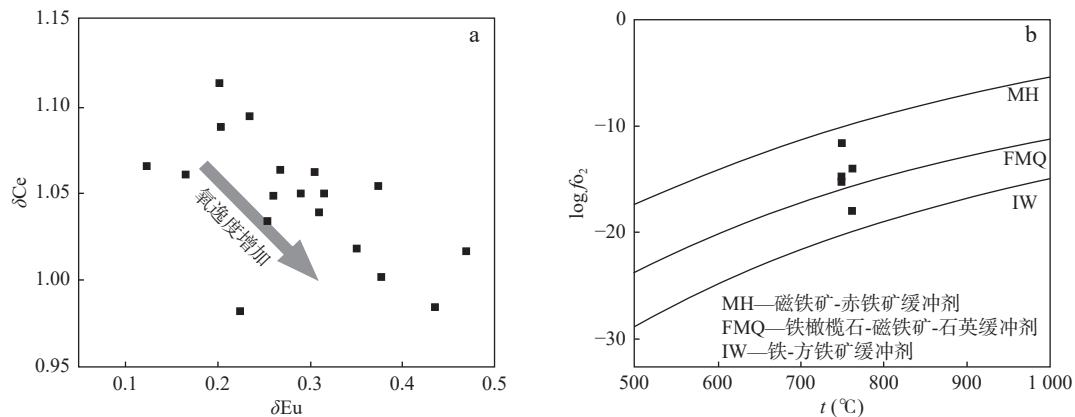


图8 磷灰石 δEu - δCe 图(a)和常用氧逸度缓冲剂的 $\log f_{\text{O}_2}$ -温度(t)图(b; 底图据 Eüster et al., 1962)

Fig. 8 (a) Apatite δEu - δCe diagram and (b) $\log f_{\text{O}_2}$ -temperature (t) diagram of common oxygen fugacity buffers

$$C_{\text{Cl}}^{\text{melt}} (\text{ppm}) = 10\,000 \times 10.79 \times \frac{X_{\text{Cl}}^{\text{Ap}}}{X_{\text{OH}}^{\text{Ap}}} \div \left(e^{[25.81 + (X_{\text{Cl}}^{\text{Ap}} - X_{\text{OH}}^{\text{Ap}}) \times 17.33] \times \frac{1000}{T + 273.15}} \right) \quad (4)$$

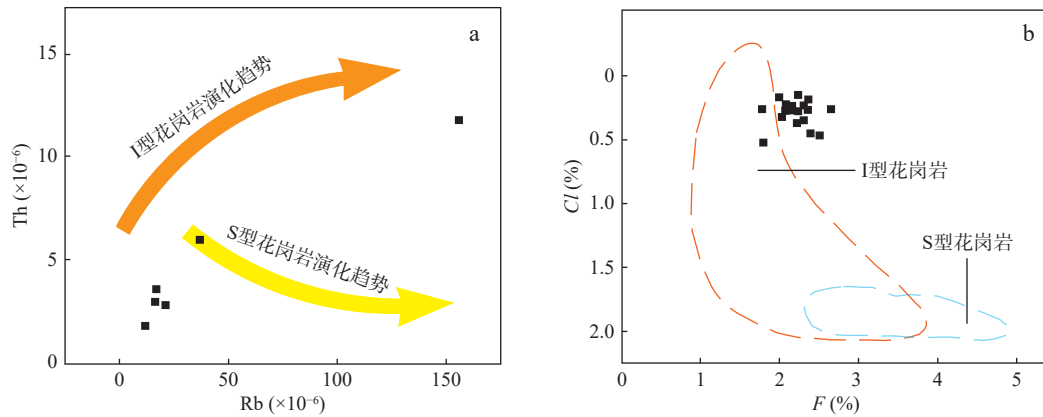
式中: T 为温度, 单位 $^{\circ}\text{C}$; X_{F}^{Ap} 、 $X_{\text{Cl}}^{\text{Ap}}$ 与 $X_{\text{OH}}^{\text{Ap}}$ 表示磷灰石中 F、Cl 和 OH 的摩尔百分比(F、Cl、OH 的摩尔百分比之和应为 1)。库鲁-捷格列克含矿岩浆 F 的含量为 $1\,466 \times 10^{-6} \sim 2\,909 \times 10^{-6}$, 平均为 $2\,069 \times 10^{-6}$; Cl 含量为 $548 \times 10^{-6} \sim 2\,033 \times 10^{-6}$, 平均为 $1\,144 \times 10^{-6}$ 。

岩浆氧逸度是反映岩浆结晶分异时($742 \sim 779\,^{\circ}\text{C}$)氧化还原状态的一个重要参数(Streck et al., 1998), 库鲁-捷格列克含矿岩体样品的 $\log f_{\text{O}_2}$ 值可以反映岩浆为较氧化状态(图 8b), 更易将金属元素从地幔携带到地壳浅部(Hattori et al., 2001; Sillitoe, 2010)。Zhang et al. (2022) 总结斑岩 Cu 矿的成矿岩浆具有明显的高 Cl 特征, Cl/F 值可高达 5; 斑岩 Au 矿的成矿岩浆具有低 F (低于 $1\,000 \times 10^{-6}$)、高 Cl (达 $3\,000 \times 10^{-6}$) 的特征; 斑岩 REE 矿的成矿岩浆 Cl 含量明显较低($50 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$); 而斑岩 Mo 矿则以具有极高的 F 含量(高达 $20\,000 \times 10^{-6}$)、Cl 含量变化范围大($100 \times 10^{-6} \sim 2\,000 \times 10^{-6}$) 为特征。Chang et al. (2008) 认为, 岩浆中高 F 含量有利于矽卡岩型矿床矿化, 高 F 含量会导致流体出溶过程延长, 降低了热液的出溶温度, 从而易发生冷却沉淀。这些特征表明 F、Cl 在不同金属的运移、富集过程中确实发挥了不同的作用, 并表现出不同的成矿专属性。库鲁-捷格列克成矿岩浆的 Cl 和 F 含量特征介于斑岩型 Cu 矿和斑岩型 Au 矿之间, 且具有明显较高的 F 含量, 总体显示其能够演化成为矽卡岩型铜金矿床的优势。

5.2 岩石成因

中天山恰尔卡特地区出露的侵入岩主要有闪长

岩、石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩等(Soloviev et al., 2018; Zu et al., 2019), 库鲁-捷格列克铜金矿床成矿花岗闪长岩的岩相学和岩石地球化学特征与前人研究结果基本一致(图 4、图 5)。花岗闪长岩常见于 I 型、A 型和 S 型花岗岩, 岩相学观察结果显示库鲁-捷格列克花岗闪长岩不含 A 型花岗岩的特征矿物, 如钠闪石-钠铁闪石、霓石、霓辉石等碱性暗色矿物(王国辉等, 2019)。此外, A 型花岗岩形成温度较高, 一般大于 $800\,^{\circ}\text{C}$ (King et al., 2001), 而锆石 Zr 饱和温度计计算结果显示库鲁-捷格列克花岗闪长岩的形成温度为 $742 \sim 779\,^{\circ}\text{C}$, 明显低于 $800\,^{\circ}\text{C}$, 表明其可能不是 A 型花岗岩。I 型和 S 型花岗岩通常具有相似的主量元素地球化学特征和矿物组合, 因此成因类型不易通过主量元素和矿物组合准确识别(吴福元等, 2007)。然而由于岩浆起源的差异, 二者在微量元素组成方面存在一定差异。例如, 在 Th-Rb 协变关系图中, 库鲁-捷格列克花岗闪长岩样品的 Rb 与 Th 含量之间呈现正相关关系(图 9a), 与典型 I 型花岗岩的演化趋势一致。磷灰石和锆石地球化学特征对岩石成因类型也具有指示意义, 不同成因类型花岗岩中磷灰石和锆石的稀土配分模式存在差异。例如, I 型花岗岩中的磷灰石具有右倾型 REE 配分模式, 而 S 型花岗岩中的磷灰石则表现出相对平坦的 REE 配分模式(Sha et al., 1999; Белоусова et al., 2001; Wang et al., 2012; Laurent et al., 2017)。库鲁-捷格列克花岗闪长岩中磷灰石与锆石的稀土配分模式与前人研究的“典型 I 型花岗岩”中的磷灰石稀土配分模式具有一定相似性(图 6、图 7)。前人发现, I 型花岗岩中磷灰石常具有低 F 的特点, 而 S 型花岗岩中的磷灰石常具有高 F 低 Cl 的特点(Sha et al., 1999; Chu et al., 2009;



a. I型和S型花岗岩趋势据 Sha et al. (1999); b. 底图据 Sha et al. (1999)、张晓兵等(2022)

图9 全岩样品 Th-Rb 协变图解(a)和磷灰石 Cl-F 图(b)

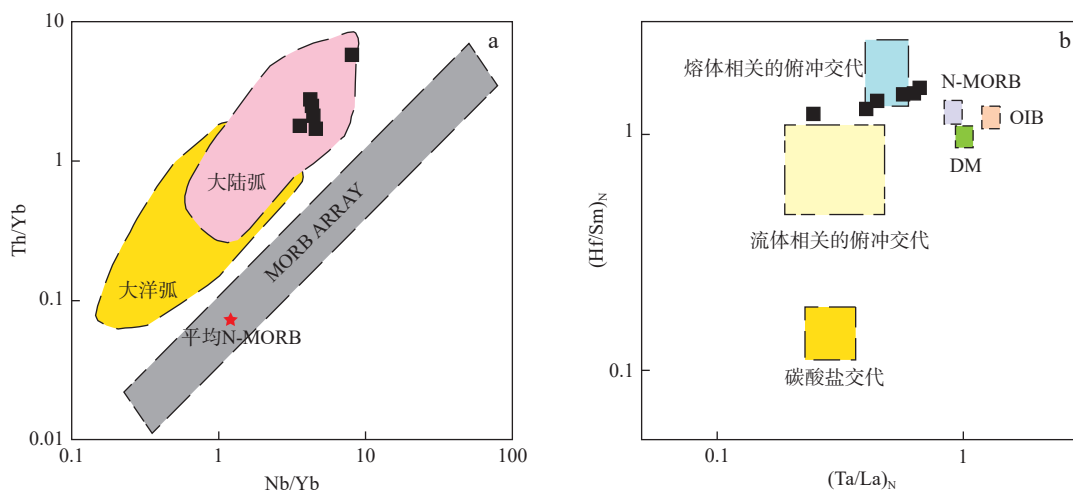
Fig. 9 (a) Th-Rb covariant diagram of whole rock samples and (b) Apatite Cl-F diagram

Zhang et al., 2020)。在 Cl-F 图中, 库鲁-捷格列克花岗闪长岩中的磷灰石接近 I 型花岗岩而远离 S 型花岗岩 (图 9b)。以上推断表明, 库鲁-捷格列克花岗闪长岩属于 I 型花岗岩。

库鲁-捷格列克花岗闪长岩表现出 Nb、Ta 和 Ti 的负异常 (图 5a), 与受俯冲物质交代的岩石圈地幔发生部分熔融所形成的岩浆特征相似 (Zeng et al., 2021), 并且具有明显高于 N-MORB 的 Th/Yb 值 (图 10a), 表示其源区可能有俯冲沉积物的加入 (Li et al., 2014)。在 $(\text{Hf}/\text{Sm})_{\text{N}}-(\text{Ta}/\text{La})_{\text{N}}$ 图中, 样品均落于与流体-熔体相关的区域附近, 反映其源区受到了俯冲流体的交代 (图 10b)。前人实验数据表明, 单一地幔或下地壳 Cl 含量通常较低 (通常 $< 1000 \times 10^{-6}$) (Sha et al., 1999; Stroncik et al., 2004; Lassiter et al., 2022), 而库鲁-捷格

列成矿岩体中具有相对较高的 Cl 含量 ($548 \times 10^{-6} \sim 2033 \times 10^{-6}$), 因此需要有另外的 Cl 源区, 而这个额外 Cl 源则极有可能为俯冲板片脱水形成的流体。在 Sr/Th-La/Sm 图解中, 部分磷灰石样品也表现出明显的板块脱水流体加入趋势, 并反映有沉积物组分的加入 (图 11a), 而在磷灰石稀土元素三角图中, 所有样品落入地幔-壳幔混合区域 (图 11b)。

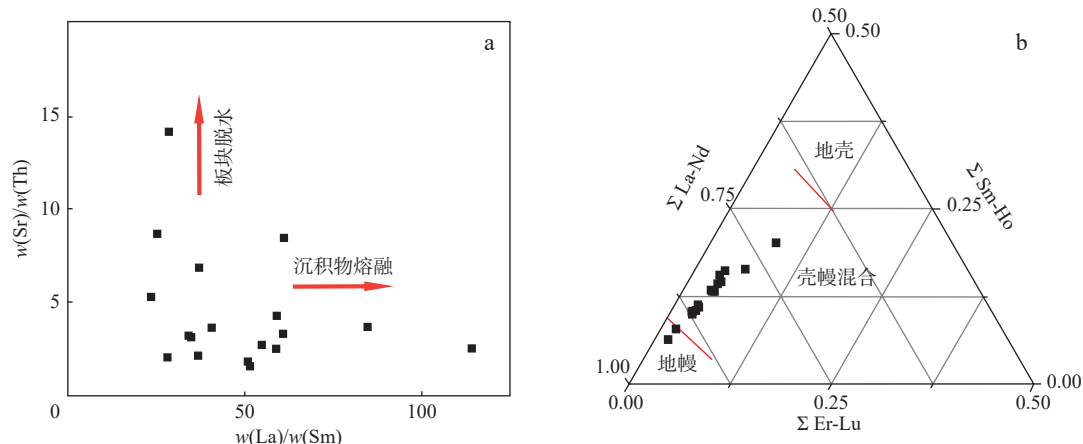
前人研究表明, 库鲁-捷格列克矿床所在的恰尔卡特成矿带在晚古生代 (330~270 Ma) 的岩浆作用主要与土耳其斯坦洋壳向北俯冲相关, 随后洋盆逐渐闭合并与中天山碰撞 (Biske et al., 2013; 陈博等, 2016)。库鲁-捷格列克矿区岩浆-成矿事件发生于 325~323 Ma (Seltmann et al., 2011; Seltmann et al., 2014; Dolgoplova et al., 2017; Zu et al., 2019), 处于土耳其斯坦洋



底图据 Pearce et al. (1995)、Flèche et al. (1998)

图10 Th/Yb-Nb/Yb 图解(a)和 $(\text{Hf}/\text{Sm})_{\text{N}}-(\text{Ta}/\text{La})_{\text{N}}$ 图解 (b)

Fig. 10 (a) Th/Yb-Nb/Yb diagram and (b) $(\text{Hf}/\text{Sm})_{\text{N}}-(\text{Ta}/\text{La})_{\text{N}}$ diagram



板块脱水与沉积物熔融趋势据 Ding et al. (2015); 底图据朱笑青等(2004)

图11 磷灰石 Sr/Th-La/Sm 图解(a)与稀土元素三角图(b)

Fig. 11 (a) Diagram of Apatite Sr/Th-La/Sm and (b) triangle diagram of REE

壳向北俯冲期间。结合与成矿有关岩体I型花岗岩的成因类型,以及受俯冲物质交代地幔楔所形成岩浆的典型全岩和矿物地球化学特征,推断库鲁-捷格列克铜金矿床为早石炭世晚期土耳其斯坦洋壳向北俯冲过程中,受俯冲洋壳组分交代的地幔楔部分熔融形成的高氧逸度、高挥发分含量的含矿岩浆,侵入于下石炭统多内昔组灰岩中,经挥发分出溶形成的含矿岩浆热液与灰岩相互作用而形成的矽卡岩型 Cu-Au 矿床。

6 结论

(1)库鲁-捷格列克铜金矿床成矿岩体为花岗闪长岩,属于过铝质、钙碱性、I型花岗岩系列。

(2)成矿岩浆温度为 742~779 °C,具有较高氧逸度和高挥发分含量(F 值为 $1.466 \times 10^{-6} \sim 2.909 \times 10^{-6}$; Cl 值为 $548 \times 10^{-6} \sim 2.033 \times 10^{-6}$),具备形成矽卡岩型矿床的有利岩浆条件。

(3)库鲁-捷格列克成矿母岩浆起源于受俯冲板片物质交代的地幔楔,含矿岩浆向上侵入于下石炭统多内昔组灰岩中,经流体出溶形成的含矿岩浆热液与灰岩反应形成库鲁-捷格列克矽卡岩型铜金矿床。

致谢: 全岩主微量元素分析实验得到了西北大学大陆动力学国家重点实验室刘焯高级工程师的帮助,王续文协助开展了本研究相关的部分实验工作,两位匿名审稿专家提出了宝贵的修改建议,在此表示衷心的感谢。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 曹积飞, 翁凯, Movlanov Jahongir Jurabekovich, 等. 乌兹别克斯坦中天山金铜成矿特征与找矿潜力评价[J]. 中国地质, 2023, 50(6): 1731-1744.
- CAO Jifei, WENG Kai, Movlanov Jahongir Jurabekovich, et al. Gold-Copper Metallogenic Characteristics and Prospecting Potentiality in the Central Tianshan Region[J]. *Geology in China*, 2023, 50(6): 1731-1744.
- 陈博, 马中平, 孟广路, 等. 吉尔吉斯斯坦中天山地质特征及研究进展[J]. 中国地质, 2016, 3(2): 458-469.
- CHEN Bo, MA Zhongping, MENG Guanglu, et al. The Progress in Geological Study of Middle Tianshan Mountains within Kyrgyzstan[J]. *Geology in China*, 2016, 3(2): 458-469.
- 姜雨奇, 程志国, 魏博雯. 乌兹别克斯坦中天山 Kattasay 地区 A 型花岗岩的岩石成因和构造意义[J]. 岩石学报, 2023, 39(11): 3284-3306.
- JIANG Yuqi, CHENG Zhiguo, WEI Bowen. Petrogenesis and Tectonic Implications of A-Type Granite in the Kattasay Region, Middle Tianshan, Uzbekistan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(11): 3284-3306.
- 李平, 朱涛, 吕鹏瑞, 等. 西天山早寒武世夏特辉长岩: 南天山洋早期俯冲的岩浆记录[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 1-15.
- LI Ping, ZHU Tao, LÜ Pengrui, et al. Early Cambrian Xiata Gabbro in Western Tianshan: Magmatic Records of Initial Subduction of the South Tianshan Ocean[J]. *Northwestern Geology*, 2024,

- 57(3): 1-15.
- 李华伟, 杨志明. 吉尔吉斯铜金矿床类型与地质特征[J]. 新疆地质, 2023, 97(4): 973-1001.
- LI Huawei, YANG Zhiming. Geological Characteristics and Mineral Type of Cu-Au Deposits in Kyrgyzstan[J]. Xinjiang Geology, 2023, 97(4): 973-1001.
- 刘春涌. 吉尔吉斯斯坦库鲁捷格列克大型矽卡岩型铜矿床[J]. 中亚信息, 2005(12): 19-21.
- LIU Chunyong. The Large Skarn-Type Copper Deposit of Kuru-Tegerek in Kyrgyzstan[J]. Central Asia Information, 2005(12): 19-21.
- 刘洪, 张晖, 李光明, 等. 藏北羌塘南缘早白垩世青草山强过铝质 S 型花岗岩的成因: 来自地球化学和锆石 U-Pb 年代学的约束[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(5): 848-860.
- LIU Hong, ZHANG Hui, LI Guangming, et al. Petrogenesis of the Early Cretaceous Qingcaoshan Strongly Peraluminous S-Type Granitic Pluton, Southern Qiangtang, Northern Tibet: Constraints from Whole-Rock Geochemistry and Zircon U-Pb Geochronology[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2016, 52(5): 848-860.
- 吕鹏瑞. 丝绸之路沿线 29 国矿业投资环境评价[M]. 北京: 地质出版社, 2021.
- 吕鹏瑞, 孟广路, 王斌, 等. 吉尔吉斯斯坦塔耳迪布拉克斑岩型金铜矿床地球化学特征及其意义[J]. 地质与勘探, 2017, 53(5): 935-946.
- LÜ Pengrui, MENG Guanglu, WANG Bin, et al. Geochemical Characteristics of the Taldy Bulak Porphyry Au-Cu Deposit in Kyrgyzstan and its Significance[J]. Geology and Exploration, 2017, 53(5): 935-946.
- 吕鹏瑞. 新形势下中国与中亚国家矿产资源合作研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2022.
- 王国辉, 王志忠, 严城民. 花岗岩成因类型划分与地球化学图解判别综述[J]. 云南地质, 2019, 38(1): 28-37.
- WANG Guohui, WANG Zhizhong, YAN Chengmin. A Survey of the Genesis Classification and Geochemical Diagram Discrimination of Granite[J]. Yunnan Geology, 2019, 38(1): 28-37.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1217-1238.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, YANG Jinhui, et al. Discussions on the Petrogenesis of Granites[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(6): 1217-1238.
- 邢凯, 舒启海, 赵鹤森, 等. 滇西普朗斑岩铜矿床中磷灰石的地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2018, 34(5): 1427-1440.
- XING K, SHU Qihai, ZHAO Hesen, et al. Geochemical Characteristics and Geological Significance of Apatites in the Pulang Porphyry Copper Deposit, NW Yunnan Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(5): 1427-1440.
- 薛春纪, 赵晓波, 莫宣学, 等. 西天山“亚洲金腰带”及其动力背景和成矿控制与找矿[J]. 地学前缘, 2014, 21(5): 128-155.
- XUE Chunji, ZHAO Xiaobo, MO Xuanxue, et al. Asian Gold Belt in Western Tianshan and its Dynamic Setting, Metallogenic Control and Exploration. Earth Science Frontiers[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(5): 128-155.
- 于海峰, 王福君, 潘明臣, 等. 西天山造山带区域构造演化及其大陆动力学解析[J]. 西北地质, 2011, 44(2): 25-40.
- YU Haifeng, WANG Fujun, PAN Mingchen, et al. Regional Tectonic Evolution and Continental Dynamic characteristics of Western Tianshan Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2011, 44(2): 25-40.
- 张京渤, 安芳. 斑岩型铜矿床成矿斑岩岩浆氧化状态研究方法综述[J]. 矿床地质, 2018, 37(5): 1052-1064.
- ZHANG Jingbo, AN Fang. Methods for estimating magma oxidation state of porphyry copper deposits: A review[J]. Mineral Deposits, 2018, 37(5): 1052-1064.
- 张晓兵, 郭锋, 张博. 福建漳州花岗闪长岩成因: 来自磷灰石地球化学的约束[J]. 地球化学, 2022, 51(5): 585-597.
- ZHANG Xiaobing, GUO Feng, ZHANG Bo. Petrogenesis of Granodiorite in Zhangzhou, Fujian Province: Constraints from Apatite Geochemistry[J]. Geochimica, 2022, 51(5): 585-597.
- 郑瑜林, 张长青, 刘欢, 等. 滇西姚安金矿床磷灰石化学特征及指示意义[J]. 矿床地质, 2021, 40(1): 156-168.
- ZHENG Yulin, ZHANG Changqing, LIU Huan, et al. Patite Chemical Feature of Yaoan Gold Deposit in Western Yunnan and its Geological Significance[J]. Mineral Deposits, 2021, 40(1): 156-168.
- 朱笑青, 王中刚, 黄艳, 等. 磷灰石的稀土组成及其示踪意义[J]. 稀土, 2004, 25(5): 41-45.
- ZHU Xiaoqing, WANG Zhonggang, HUANG Yan, et al. REE Content and Distribution in Apatite and Its Geological Tracing Significance[J]. Chinese Rare Earths, 2004, 25(5): 41-45.
- Ballard J R, Palin M J, Campbell I H. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: application to porphyry copper deposits of northern Chile[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 144(3): 347-364.
- Белоусова Е А, Walters S, Griffin W L, et al. Trace - element signatures of apatites in granitoids from the Mt Isa Inlier, northwestern Queensland[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2001, 48(4): 603-619.
- Белоусова Е А, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: trace-element compositions and their relationship to host rock type[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2002, 76(1): 45-69.
- Berger B R, Mars J L, Denning P, et al. Porphyry copper assessment

- of western Central Asia[R]. US Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5090–N, 2010, 219: 8.
- Bi X, Cornell D H, Hu R. REE composition of primary and altered feldspar from the mineralized alteration zone of alkaline intrusive rocks, western Yunnan Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2002, 19(1–2): 69–78.
- Biske Y S, Konopelko D L, Seltmann R. Geodynamics of late Paleozoic magmatism in the Tien Shan and its framework[J]. *Geotectonics*, 2013, 47(4): 291–309.
- Buick I S, Hermann J, Maas R, et al. The timing of sub-solidus hydrothermal alteration in the Central Zone, Limpopo Belt (South Africa): Constraints from titanite U–Pb geochronology and REE partitioning[J]. *Lithos*, 2007, 98(1–4): 97–117.
- Chang Z, Meinert L D. The Empire CU-ZN Mine, Idaho: Exploration implications of unusual Skarn features related to high fluorine activity[J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 2008, 103(5): 909–938.
- Chu M F, Wang K, Griffin W L, et al. Apatite composition: Tracing petrogenetic processes in transhimalayan granitoids[J]. *Journal of Petrology*, 2009, 50(10): 1829–1855.
- Ding T, Ma D, Lu J, et al. Apatite in granitoids related to polymetallic mineral deposits in southeastern Hunan Province, Shihang zone, China: Implications for petrogenesis and metallogenesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 69: 104–117.
- Dolgoplova A, Seltmann R, Konopelko D L, et al. Geodynamic evolution of the western Tien Shan, Uzbekistan: Insights from U–Pb SHRIMP geochronology and Sr–Nd–Pb–Hf isotope mapping of granitoids[J]. *Gondwana Research*, 2017, 47: 76–109.
- Drake M J. The oxidation state of europium as an indicator of oxygen fugacity[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1975, 39(1): 55–64.
- Eügster H P, Wones D R. Stability relations of the ferruginous biotite, Annite[J]. *Journal of Petrology*, 1962, 3(1): 82–125.
- Flèche L, Camiré G, Jenner G A. Geochemistry of post-Adian, Carboniferous continental intraplate basalts from the Maritimes Basin, Magdalen Islands, Québec, Canada[J]. *Chemical Geology*, 1998, 148(3–4): 115–136.
- Harlov D E. Apatite: a fingerprint for metasomatic processes[J]. *Elements*, 2015, 11(3): 171–176.
- Hattori K, Keith J D. Contribution of mafic melt to porphyry copper mineralization: evidence from Mount Pinatubo, Philippines, and Bingham Canyon, Utah, USA[J]. *Mineralium Deposita*, 2001, 36(8): 799–806.
- Hu Z, Zhang W, Liu Y, et al. “WAVE” Signal-Smoothing and Mercury-Removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICPMS Analysis: Application to lead Isotope Analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 2015, 87(2): 1152–1157.
- King P L, Chappell B W, Allen C M, et al. Are A - type granites the high - temperature felsic granites? Evidence from fractionated granites of the Wangrah Suite[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2001, 48(4): 501–514.
- Kudrin V S, Solov'yev S G, Stavinskiy V A, et al. The gold-copper-molybdenum-tungsten ore belt of the Tien Shan[J]. *International Geology Review*, 1990, 32(9): 930–941.
- Lassiter J, Hauri E H, Nikogosian I, et al. Chlorine–potassium variations in melt inclusions from Raivavae and Rapa, Austral Islands: constraints on chlorine recycling in the mantle and evidence for brine-induced melting of oceanic crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 202(3–4): 525–540.
- Laurent O, Zeh A, Gerdes A, et al. How do granitoid magmas mix with each other? Insights from textures, trace element and Sr–Nd isotopic composition of apatite and titanite from the Matok pluton (South Africa)[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2017, 172(9): 80.
- Li Z, Chen B. Geochronology and geochemistry of the Paleoproterozoic meta-basalts from the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: Implications for petrogenesis and tectonic setting[J]. *Precambrian Research*, 2014, 255: 653–667.
- Li H, Hermann J. Chlorine and fluorine partitioning between apatite and sediment melt at 2.5 GPa, 800 °C: A new experimentally derived thermodynamic model[J]. *American Mineralogist*, 2017, 102(3): 580–594.
- Liu Y, Hu Z, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1–2): 34–43.
- Loucks R R, Fiorentini M L, Henríquez G J. New magmatic oxybarometer using trace elements in zircon[J]. *Journal of Petrology*, 2020, 61(3): ega034.
- Mao M, Rukhlov A S, Rowins S M, et al. Apatite Trace Element Compositions: a robust new tool for mineral exploration[J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 2016, 111(5): 1187–1222.
- Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37(3–4): 215–224.
- Miller C F, McDowell S M, Mapes R W. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance[J]. *Geology*, 2003, 31(6): 529.
- Pan L, Hu R, Wang X, et al. Apatite trace element and halogen compositions as petrogenetic-metallogenic indicators: Examples from four granite plutons in the Sanjiang region, SW China[J]. *Lithos*, 2016, 254–255, 118–130.
- Pearce J A, Peate D W. Tectonic implications of the composition of volcanic ARC magmas[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1995, 23(1): 251–285.
- Peng G, Luhr J F, McGee J J. Factors controlling sulfur concentra-

- tions in volcanic apatite[J]. *American Mineralogist*, 1997, 82(11-12): 1210-1224.
- Piccoli P M, Candela P A. Apatite in igneous systems[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2002, 48(1): 255-292.
- Seltmann R, Konopelko D L, Biske G, et al. Hercynian post-collisional magmatism in the context of Paleozoic magmatic evolution of the Tien Shan orogenic belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42(5): 821-838.
- Seltmann R, Porter T, Pirajno F. Geodynamics and metallogeny of the central Eurasian porphyry and related epithermal mineral systems: A review[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 79: 810-841.
- Sha L, Chappell B W. Apatite chemical composition, determined by electron microprobe and laser-ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, as a probe into granite petrogenesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(22): 3861-3881.
- Shannon R D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides[J]. *Acta Crystallographica*, 1976, 32(5): 751-767.
- Sillitoe R H. Porphyry Copper Systems[J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 2010, 105(1): 3-41.
- Soloviev S G, Kryazhev S G, Dvurechenskaya S S, et al. Geology, mineralization, and fluid inclusion study of the Kuru-Tegerek Au-Cu-Mo skarn deposit in the Middle Tien Shan, Kyrgyzstan[J]. *Mineralium Deposita*, 2018, 53(2): 195-223.
- Streck M J, Dilles J H. Sulfur evolution of oxidized arc magmas as recorded in apatite from a porphyry copper batholith[J]. *Geology*, 1998, 26(6): 523.
- Stronck N A, Haase K M. Chlorine in oceanic intraplate basalts: Constraints on mantle sources and recycling processes[J]. *Geology*, 2004, 32(11): 945.
- Sun S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- Sun S, Yang X, Wang G, et al. In situ elemental and Sr-O isotopic studies on apatite from the Xu-Huai intrusion at the southern margin of the North China Craton: Implications for petrogenesis and metallogeny[J]. *Chemical Geology*, 2019, 510: 200-214.
- Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 64(2): 295-304.
- Wang Q, Zhu D, Zhao Z, et al. Magmatic zircons from I-, S- and A-type granitoids in Tibet: Trace element characteristics and their application to detrital zircon provenance study[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 53: 59-66.
- Webster J D, Piccoli P M. Magmatic apatite: a powerful, yet deceptive, mineral[J]. *Elements*, 2015, 11(3): 177-182.
- Winchester J A, Floyd P A. Geochemical magma type discrimination: application to altered and metamorphosed basic igneous rocks[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1976, 28(3): 459-469.
- Zeng R, Lai J, Mao X, et al. Petrogenesis and tectonic significance of the Early Devonian lamprophyres and diorites in the Alxa Block, NW China[J]. *Geochemistry*, 2021, 81(1): 125685.
- Zhang C, Li X, Behrens H, et al. Partitioning of OH-F-Cl between biotite and silicate melt: Experiments and an empirical model[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2022, 317: 155-179.
- Zhang X, Guo F, Zhang B, et al. Magmatic evolution and post-crystallization hydrothermal activity in the early Cretaceous Pingtan intrusive complex, SE China: records from apatite geochemistry[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2020, 175(4).
- Zong K, Klemm R, Yuan Y, et al. The assembly of Rodinia: The correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB)[J]. *Precambrian Research*, 2017, 290: 32-48.
- Zu B, Seltmann R, Xue C, et al. Multiple episodes of Late Paleozoic Cu-Au mineralization in the Chatkal-Kurama terrane: New constraints from the Kuru-Tegerek and Bozymchak skarn deposits, Kyrgyzstan[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 113: 103077.