

变质改造型关键金属矿

——富集 Li-Rb-Cs-Tl-Ga 的云母片岩

高利娥¹, 曾令森¹, 赵令浩², 严立龙¹, 李广旭¹, 邸英龙¹, 徐倩¹, 王亚莹¹,
王海涛³, 田怡红¹

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质科学院国家地质实验测试中心, 北京 100037;
3. 天津师范大学地理与环境科学学院, 天津 300387)

摘要: 关键金属矿产是国际上最近提出的资源概念, 对战略性新兴产业的发展至关重要, 但认知程度较低。洛扎岩浆-变质杂岩体位于喜马拉雅带东部, 侵入于藏南拆离系内。在岩体东北侧, 云母片岩被含电气石淡色花岗岩捕虏。云母片岩主要由金云母、绿泥石和少量黑云母组成。从全岩地球化学成分来看, 云母片岩具有含量较高的 Al_2O_3 (13.38%~14.32%)、 K_2O (6.09%~9.66%)、 FeO^* (27.11%~30.09%)、 MgO (15.25%~17.21%)、 TiO_2 (0.09%~0.26%), 富集关键金属 Li ($650\times 10^{-6}\sim 1\,031\times 10^{-6}$)、Rb ($1\,649\times 10^{-6}\sim 2\,773\times 10^{-6}$)、Cs ($98\times 10^{-6}\sim 229\times 10^{-6}$)、Tl ($5.7\times 10^{-6}\sim 12.1\times 10^{-6}$)、Ga ($121\times 10^{-6}\sim 148\times 10^{-6}$)。单矿物化学成分分析结果表明, 金云母与全岩相似, 也富集 Li-Rb-Cs-Ga, 这些关键金属元素以类质同象形式替代 K 进入金云母。年代学分析结果显示, 锆石记录了分布广泛的碎屑年龄和新生代的变质事件。通过研究认为, 洛扎地区云母片岩的原岩为沉积岩, 在淡色花岗岩侵位过程中被捕虏, 发生了低级变质作用; 本文报道的金云母成矿作用, 是锂矿成因的新类型; 变质改造型。喜马拉雅造山带变沉积岩富集稀散金属铊和镓, 表明该地区除了稀有金属元素外, 稀散金属也有成矿潜力, 是我国未来关键金属矿产勘探的又一重要地区。本文为建立喜马拉雅造山带关键金属的成矿模型提供了新的思路, 未来需要加强该区和其他造山带变沉积岩关键金属成矿潜力的调查和研究。

关键词: 关键金属元素; Li-Rb-Cs-Tl-Ga; 金云母; 变质作用; 沉积岩; 喜马拉雅造山带

中图分类号: P583.34⁴; P618.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)01-0029-18

Metamorphic transformation type critical metal ore: Li-Rb-Cs-Tl-Ga enriched mica schist

GAO Li-e¹, ZENG Ling-sen¹, ZHAO Ling-hao², YAN Li-long¹, LI Guang-xu¹, DI Ying-long¹, XU Qian¹,
WANG Ya-ying¹, WANG Hai-tao³ and TIAN Yi-hong¹

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 National Research Center for Geoanalysis, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. School of Geographic and Environmental Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Critical metal minerals are recently proposed resource concept worldwide and are important to the development of strategic industries, but the level of awareness is still low. The Luozha pluton is located in the east of the Himalayan belt and invaded the Southern Tibet detachment system. On the northeast of this pluton, mica schist is captured by the tourmaline-bearing leucogranite. The mica schist is mainly composed of phlogopite, chlorite and minor

收稿日期: 2022-09-16; 接受日期: 2022-11-22; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2901901); 国家自然科学基金项目(41873023, 92055202, 42002071); 第二次青藏高原科学考察项目(2019QZKK0702); 中国地质调查局地质调查项目(DD20221817, DD20221630)

作者简介: 高利娥(1983-), 女, 副研究员, 地球化学专业, E-mail: liegao09@163.com。

网络首发时间: 2022-12-19; 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.p.20221215.1744.001.html>

biotite. Whole-rock element geochemical data indicate that the mica schist contains higher Al_2O_3 (13.38% ~ 14.32%), K_2O (6.09% ~ 9.66%), FeO^* (27.11% ~ 30.09%), MgO (15.25% ~ 17.21%), TiO_2 (0.09% ~ 0.26%), and is enriched in Li (650×10^{-6} ~ $1\,031 \times 10^{-6}$), Rb ($1\,649 \times 10^{-6}$ ~ $2\,773 \times 10^{-6}$), Cs (98×10^{-6} ~ 229×10^{-6}), Tl (5.7×10^{-6} ~ 12.1×10^{-6}), Ga (121×10^{-6} ~ 148×10^{-6}). The geochemical data of phlogopite show that similar to the whole rock, phlogopite also is enriched in Li-Rb-Cs-Ga, and these critical metal elements are incorporated into phlogopite by replacement of K. Chronological data indicate that zircon records widespread detrital age and Cenozoic metamorphic events. Therefore, it can be concluded that the original rock of mica schist in the Luoza area is sedimentary rock, which was captured during the invasion of leucogranite and underwent low-level metamorphism. The phlogopite mineralization reported in this paper is a new type of lithium ore genesis: metamorphic transformation type. The discovery of the metals thallium and gallium in the Himalayan orogenic belt suggests that critical metals also have mineralization potential in addition to rare metals. Our data suggest that the Himalayan belt is another important target area for the exploration of critical metals. This paper provides new ideas for establishing metallogenic models of critical metals in the Himalayan orogenic belt. It is necessary to strengthen the exploration of critical metals in sedimentary or metasedimentary rocks in the Himalayan orogenic belt and the other orogenic belts in the future.

Key words: critical metal; Li-Rb-Cs-Tl-Ga; phlogopite; metamorphism; sedimentary rock; Himalaya orogen belt

Fund support: National Key Research and Development Plan (2021YFC2901901); National Natural Science Foundation of China (41873023, 92055202, 42002071); The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research (2019QZKK0702); China Geological Survey Project (DD20221817, DD20221630)

关键金属包括稀有(锂、铍、铷、铯、铌、钽、锆、铪、钨、锡)、稀土及稀散(镓、锗、硒、碲、铟、碲、镱、铊)及稀贵金属(毛景文等, 2019a; 王登红, 2019), 对战略性新兴产业(如航空航天、军事、芯片和新能源等)的发展至关重要(翟明国等, 2019; 蒋少涌等, 2020; 侯增谦等, 2020)。但是, 关键金属矿产是国际上最近提出的资源概念, 针对此类矿床的专门研究刚刚起步, 认知程度较低(侯增谦等, 2020), 关键金属的富集和成矿机制是目前国际矿床学研究的热点(毛景文等, 2019b)。

最近5年的研究发现, 藏南喜马拉雅新生代淡色花岗岩形成过程中伴随着稀有金属元素(Nb、Ta、Sn、Be、Li等)的富集, 在拿日雍错(也叫错那洞)发现了超大型的Be-W-Sn矿床(李光明等, 2017), 在珠峰地区发现了数十条锂辉石伟晶岩脉(吴福元等, 2021; 秦克章等, 2021)。这些发现表明喜马拉雅造山带稀有金属成矿潜力大, 是未来矿产勘探的重要靶区, 很可能成为我国新的重要稀有金属成矿带(Wang *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2020; 李光明等, 2017, 2021; 曾令森等, 2017; 高利娥等, 2021; 吴福元等, 2021; 秦克章等, 2021)。吴福元等(2021)提出, 未来需要尽快加强喜马拉雅地区的稀有金属成矿调查和研究工作, 为中国稀有金属矿产资源接替基地的找寻提供理论依据。我们团队曾在吉隆和亚

东地区发现侵入到藏南拆离系的淡色花岗岩含有较高的Sn、Cs、Tl、Be、W、B、Li、Bi等关键金属元素(高利娥等, 2021), 但在喜马拉雅淡色花岗岩关键金属富集和成矿机理、影响因素、成矿背景等方面有待深入研究, 以形成新认识, 揭示成矿潜力高的勘探靶区。

世界上锂矿床成因类型目前主要有卤水型、花岗伟晶岩及花岗岩型、沉积型3种(王登红等, 2022)。最近, 我们团队在洛扎地区发现了一种新的锂矿成因类型: 变质改造型, 本文对洛扎地区富集Li-Rb-Cs-Tl-Ga的云母片岩进行了测年、全岩化学分析和单矿物成分分析, 并在此基础上初步探讨了云母片岩富集关键金属的过程, 这可以为建立喜马拉雅造山带关键金属的成矿模型提供新的思路。

1 地质背景与样品

喜马拉雅造山带呈E-W向弧形展布, 自北向南依次为特提斯喜马拉雅带、高喜马拉雅结晶带、低喜马拉雅带和次喜马拉雅带, 它们之间的界限分别为藏南拆离系(STDS)、主中央逆冲断层(MCT)、主边界逆冲断层(MFT)(图1)。

洛扎岩体位于喜马拉雅带东部, 岩体规模巨大, 分布于中国和不丹, 境内部分出露面积可达1 780 km²

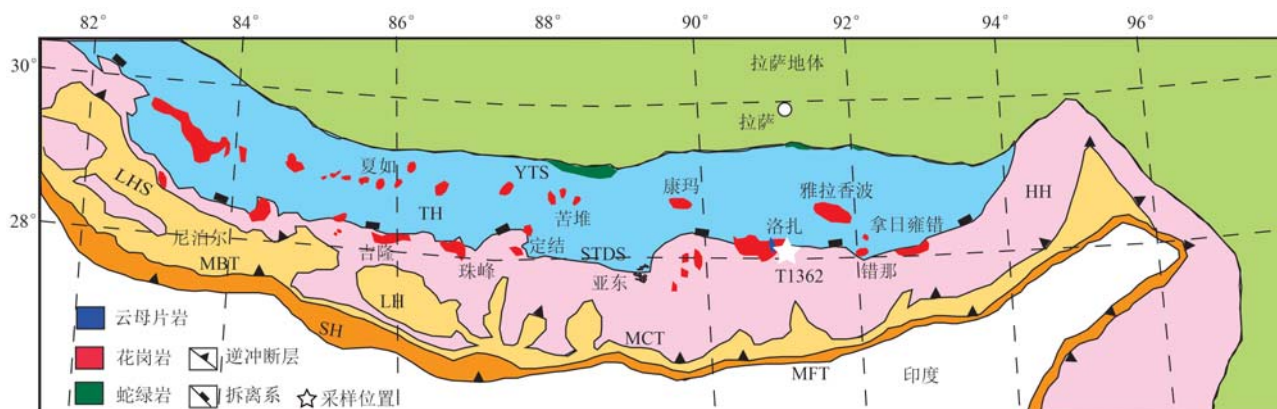


图 1 藏南喜马拉雅造山带地质简图

Fig. 1 Simplified geologic map of the Himalayan orogenic belt, Southern Tibet

YTS—雅鲁藏布江缝合带; STDS—藏南拆离系; MCT—主中央逆冲推覆带; MBT—主边界逆冲推覆带; MFT—主前缘逆冲推覆带;

TH—特提斯喜马拉雅；HH—高喜马拉雅；LH—低喜马拉雅；SH—次喜马拉雅

YTS—Yarlung Zangbo suture; STDS—Southern Tibet detachment system; MCT—main center thrust; MBT—main boundary thrust;

MFT—main frontier thrust; TH—Tethyan Himalaya; HH—high Himalaya; LH—lower Himalaya; SH—sub-Himalaya

(童劲松等, 2003)。该花岗岩体位于藏南拆离系附近, 向北侵位于特提斯喜马拉雅沉积岩系, 向南侵入高喜马拉雅结晶岩系, 岩性主要为二云母花岗岩和含电气石花岗岩, 为变泥质岩含水熔融作用和脱水熔融作用的产物 (Huang *et al.*, 2017)。已有的 U-Pb 年代学研究结果显示该岩体为多期次的复式岩体, 早期岩浆活动时代大约为 20~15 Ma, 在大约 12 Ma 再次出现岩浆活动 (Edwards and Harrison,

1997; Huang *et al.*, 2017)。在岩体东北侧,宽约 100 m、高约 60 m 的云母片岩被含电气石淡色花岗岩捕虏(图 2)。云母片岩主要由金云母、绿泥石和少量黑云母组成(图 3)。金云母具有两种形态,大部分为浅黄色鳞片状结合体(图 3a、3b),少量为白色片状,边部蚀变成鳞片状的绿泥石,核部残留有黑云母(图 3c、3d)。在云母片岩中可以看到淡色花岗岩侵入体(图 3e、3f)。

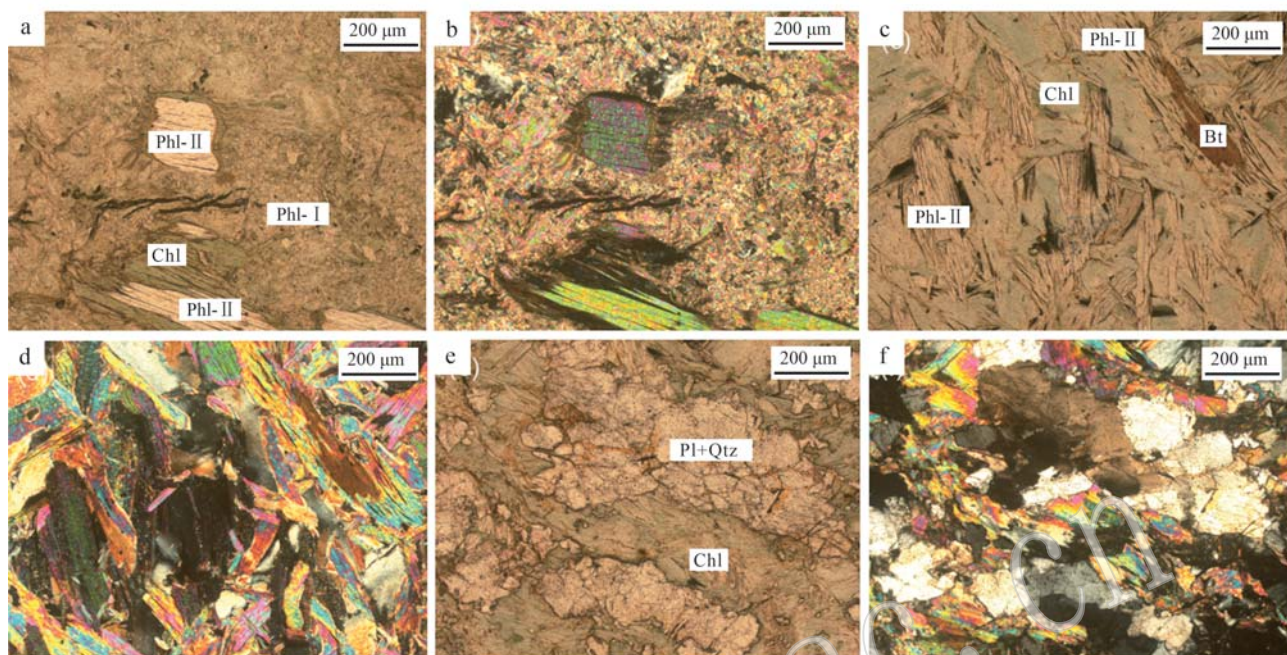


图3 云母片岩的显微照片

Fig. 3 Photomicrographs showing the texture and mineral assemblage of mica schist

Bt—黑云母; Chl—绿泥石; Phl—金云母; Pl—斜长石; Qtz—石英; a、c、e 为单偏光; b、d、f 为正交偏光
Bt—biotite; Chl—chlorite; Phl—phlogopite; Pl—plagioclase; Qtz—quartz; a, c and e are taken under single polarized light;
b, d and f are taken under orthogonal polarized light

石不同生长域差异特征选取锆石 U-Pb 测试点。锆石原位 U-Pb 定年在国家地质实验测试中心 LA-ICP-MS 实验室采用 New Wave UP213Nd:YAG 激光器及 Thermo-Finnigan ELEMENT XR 高分辨电感耦合等离子体质谱仪进行,该质谱仪具有高灵敏度特征,更利于低含量元素的准确测定。激光剥蚀斑束直径 25 μm ,光斑移动速度 1 $\mu\text{m}/\text{s}$,频率 10 Hz,以 He 作为剥蚀物质传输载气。实验前剥蚀 NIST612 进行仪器信号调谐, ^{232}Th 和 ^{238}U 信号大于 2×10^5 cps,氧化物产率 (ThO^+/Th^+) < 0.2%,同位素信号比值 $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th} \approx 1$,可降低分析过程中动态分馏作用的影响。单点分析包括气体背景采集时间 20 s,激光剥蚀样品信号采集时间 40 s,剥蚀后吹扫时间 20 s。分析时所用外标样为 SRM610 锆石,每分析 10 个未知样品点插入分析标准 91500 样品 2 点和质量监控 ple 样品 1 点,以便及时校正,保障测试精度。分析数据的离线处理(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-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal 完成,锆石年龄谱和图用 Isoplot 3.0 程序获得。

2.2 全岩主量及微量元素含量

全岩主量及微量元素的测试在国家地质实验测试中心进行。全岩主量元素通过 XRF (X 荧光光谱仪 3080E)方法测试,分析精度为 5%。全岩微量元素和稀土元素 (REE) 通过等离子质谱仪 (ICP-MS-Excell) 分析,含量大于 10×10^{-6} 的元素的测试精度为 5%,小于 10×10^{-6} 的元素精度为 10%,个别含量低的元素测试误差大于 10%。

2.3 单矿物主量和微量元素含量

云母和绿泥石的主量元素分析在中国地质科学院地质研究所进行,所用仪器为日本电子 JEOL 公司的 JXA-8100 电子探针显微分析仪,加速电压 15 kV,束流 2×10^{-8} A,摄谱时间 10 s,束斑 5 μm ,ZAF 校正,SPI 组合标样校正。云母和绿泥石的微区原位微量元素分析在国家地质测试分析研究中心的 Finnigan ELEMENT 2 ICP-MS 上进行,激光剥蚀系统为新浪 UP-213 nm 激光器,激光剥蚀孔径为 44 μm ,激光脉冲频率为 10 Hz,能量为 90 mJ,详细的分析方法和流程同胡明月等(2008)。数据处理过程中选择 Ca 作为内标元素、国际标准玻璃 NIST610 用于外标校

正,绝大部分微量元素分析的准确度优于 10%, Be、P、Ni、Zn、Ga 和 Yb 的准确度优于 20%。云母中的 Li 含量可以通过 LA-ICP-MS 进行精确的测定,也可以通过电子探针数据进行估算,本文采用 LA-ICP-MS 原位测定了片状金云母的 Li 含量,同时利用电子探针数据和经验公式计算了云母的 Li_2O 含量。

3 数据及结果

3.1 云母片岩的形成时代

阴极发光图像显示大部分锆石为浑圆状(图 4a),粒径 30~80 μm ,为碎屑锆石。部分锆石具核-边结构,核部见微弱振荡环带,边部呈均一化的灰白

色。锆石中 Th 和 U 含量变化较大,分别为 13×10^{-6} ~ 536×10^{-6} 和 60×10^{-6} ~ $1\,598\times 10^{-6}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布范围很广,2 629.5~8.6 Ma,主要集中于约 800 Ma、约 500 Ma 和 18~12 Ma(图 4b、表 1)。年龄为约 800 Ma 的锆石多具有微弱的震荡环带,其年龄记录的是一期岩浆事件;年龄为约 500 Ma 的锆石呈现均一化的灰白色,其年龄记录的是一期变质事件;年龄为 18~12 Ma 的新生代锆石呈现均一化的灰白色,未见岩浆锆石典型的振荡环带,Th 和 U 含量较低,为 13×10^{-6} ~ 55×10^{-6} 和 143×10^{-6} ~ 535×10^{-6} , $\text{Th}/\text{U}=0.06\sim 0.2$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄又集中于 13.5~12.1 Ma 和 18.4~16.0 Ma 两阶段(图 4c),其年龄代表了岩石的变质时间。

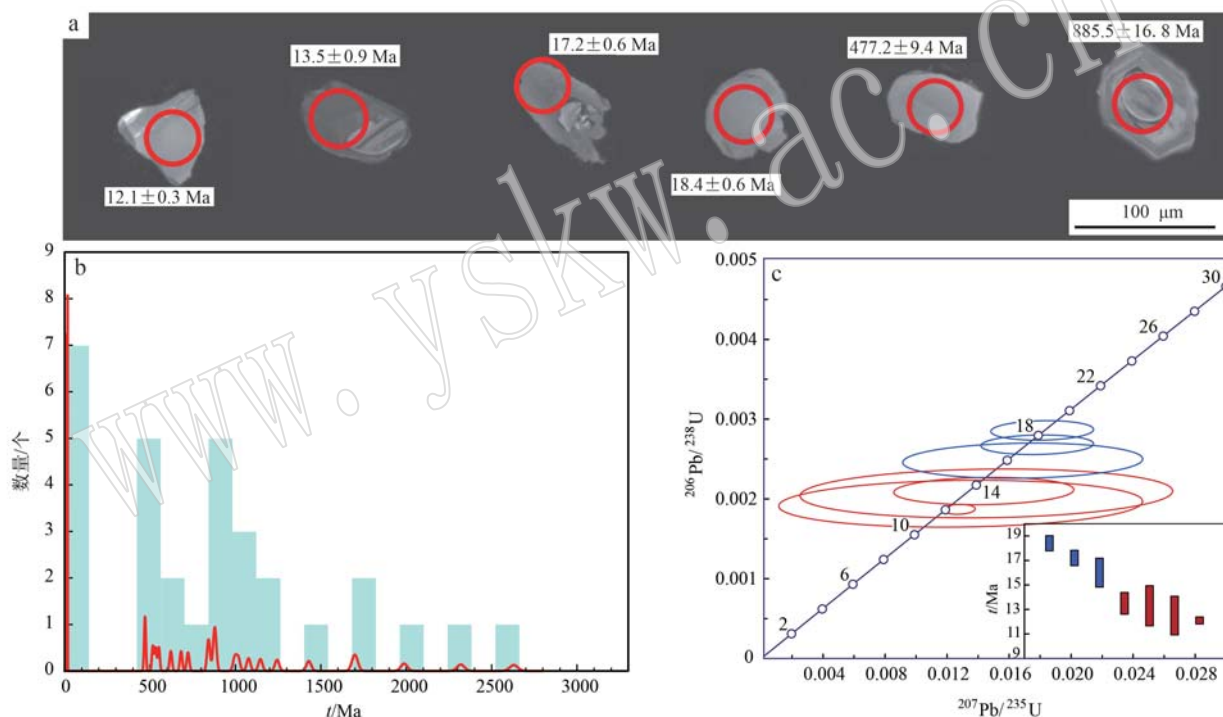


图 4 云母片岩中锆石的阴极发光照片(a)和 U-Pb 定年谐和图(b、c)

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) showing the texture, spot, and respective age of zircon U-Pb dating (a) and U-Pb concordia diagrams (b, c) for the mica schist

3.2 全岩元素地球化学特征

云母片岩的全岩化学分析结果列在表 2 中。从表 2 中可见,云母片岩的 Al_2O_3 (13.38%~14.32%)、 K_2O (6.09%~9.66%)、 FeO^{T} (27.11%~30.09%)、 MgO (15.25%~17.21%)、 TiO_2 (0.09%~0.26%) 含量较高, SiO_2 (38.11%~39.89%)、 CaO ($\leq 1.60\%$)、 Na_2O ($\leq 0.01\%$) 含量较低。

微量元素方面,云母片岩具有较高的 Rb 含量 ($1\,649\times 10^{-6}$ ~ $2\,773\times 10^{-6}$), $\text{Zr}/\text{Hf}=19.66\sim 29.77$,

$\text{Nb}/\text{Ta}=4.77\sim 7.99$ (表 2)。大部分云母片岩稀土元素含量非常低, $\sum \text{REE} < 2.5\times 10^{-6}$ 。

关键金属元素方面,云母片岩富集 Li (650×10^{-6} ~ $1\,031\times 10^{-6}$)、Rb ($1\,649\times 10^{-6}$ ~ $2\,773\times 10^{-6}$)、Cs (98×10^{-6} ~ 229×10^{-6})、Tl (5.7×10^{-6} ~ 12.1×10^{-6})、Ga (121×10^{-6} ~ 148×10^{-6}), 但 Nb ($\leq 30.5\times 10^{-6}$)、Ta ($\leq 5.82\times 10^{-6}$)、Be ($\leq 1.59\times 10^{-6}$)、B ($\leq 4.35\times 10^{-6}$)、W ($\leq 0.23\times 10^{-6}$)、Sn ($\leq 5.82\times 10^{-6}$) 含量很低(图 5、表 2)。

表 1 云母片岩中锆石 U-Pb 定年数据
Table 1 zircon U-Pb isotopic data for the mica schist

样品号	分析位置	$w_B/10^{-6}$				Th/U	同位素比值				年龄/Ma				谐和度/%			
		Pb		Th			207Pb/235U		206Pb/238U		207Pb/206Pb		207Pb/235U			206Pb/238U		
		Pb	Th	U			1σ		1σ	1σ		1σ		1σ			1σ	
Tl362-001	核部	68	247	249	0.99	0.079 34	0.001 87	2.127 5	0.053 2	0.194 6	0.004 4	1 180.7	45.95	1 157.8	17.3	1 146.4	23.5	99
Tl362-002	核部	80	137	299	0.46	0.083 29	0.001 77	2.442 2	0.055 9	0.212 8	0.004 7	1 275.8	41.00	1 255.1	16.5	1 243.9	25.1	99
Tl362-003	核部	190	241	497	0.49	0.103 23	0.002 06	4.276 2	0.093 1	0.300 7	0.006 6	1 683.0	36.41	1 688.8	17.9	1 694.8	32.9	100
Tl362-004	边部	0	27	143	0.19	0.048 19	0.036 38	0.012 9	0.009 6	0.001 9	0.000 2	108.4	1 197.12	13.0	9.6	12.5	1.6	96
Tl362-005	核部	134	139	1 598	0.09	0.056 93	0.001 24	0.593 6	0.013 9	0.075 7	0.001 7	488.2	47.56	473.2	8.9	470.3	10.0	99
Tl362-006	核部	168	301	811	0.37	0.074 24	0.001 64	1.747 6	0.041 3	0.170 9	0.003 8	1 048.1	44.02	1 026.3	15.3	1 016.8	20.9	99
Tl362-007	核部	109	147	636	0.23	0.068 94	0.001 65	1.388 4	0.035 0	0.146 2	0.003 3	897.0	48.62	884.0	14.9	879.5	18.3	99
Tl362-008	核部	69	117	392	0.30	0.068 54	0.001 49	1.384 7	0.032 3	0.146 6	0.003 2	884.9	44.36	882.4	13.7	882.1	18.2	100
Tl362-009	核部	39	133	217	0.61	0.067 07	0.001 60	1.288 8	0.032 3	0.139 5	0.003 1	840.0	48.78	840.7	14.3	841.7	17.5	100
Tl362-010	核部	46	257	399	0.64	0.057 43	0.001 36	0.707 1	0.017 7	0.089 4	0.002 0	507.6	51.65	543.0	10.5	551.9	11.7	98
Tl362-011	核部	18	36	156	0.23	0.060 70	0.002 47	0.847 1	0.034 5	0.101 3	0.002 4	628.6	85.26	623.0	19.0	622.0	14.0	100
Tl362-012	核部	74	83	549	0.15	0.065 96	0.001 45	1.078 0	0.025 2	0.118 6	0.002 6	805.1	45.28	742.7	12.3	722.7	15.1	97
Tl362-013	核部	66	84	168	0.50	0.106 48	0.002 44	4.436 7	0.107 2	0.302 4	0.006 7	1 739.9	41.41	1 719.2	20.0	1 703.4	33.3	99
Tl362-014	核部	85	141	495	0.29	0.067 94	0.001 91	1.362 5	0.039 4	0.145 6	0.003 3	8 66.9	57.28	872.9	17.0	876.0	18.5	100
Tl362-015	核部	100	536	479	1.12	0.071 77	0.001 52	1.383 5	0.031 3	0.139 9	0.003 1	979.3	42.56	881.9	13.4	844.2	17.4	96
Tl362-016	核部	107	59	731	0.08	0.090 76	0.001 85	1.576 9	0.034 6	0.126 1	0.002 8	1 441.5	38.40	961.2	13.6	765.6	15.8	77
Tl362-017	核部	25	363	170	2.14	0.056 64	0.001 69	0.651 1	0.019 9	0.083 4	0.001 9	476.8	64.81	509.1	12.3	516.6	11.2	99
Tl362-018	核部	57	66	265	0.25	0.075 76	0.001 76	1.898 3	0.046 3	0.181 9	0.004 0	1 088.8	45.61	1 080.5	16.2	1 077.1	21.9	100
Tl362-019	核部	109	103	228	0.45	0.151 21	0.003 19	7.524 1	0.168 9	0.361 1	0.008 0	2 359.7	35.53	2 175.9	20.1	1 987.6	37.7	91
Tl362-020	核部	55	104	166	0.63	0.089 78	0.001 95	3.071 9	0.070 9	0.248 3	0.005 5	1 420.8	40.96	1 425.7	17.7	1 429.8	28.2	100
Tl362-021	边部	3	36	230	0.15	0.107 67	0.012 99	0.122 8	0.014 1	0.008 3	0.000 4	1 760.4	205.63	117.6	12.8	53.1	2.3	24
Tl362-022	核部	48	51	371	0.14	0.064 37	0.001 42	0.989 7	0.023 1	0.111 6	0.002 4	753.8	46.02	698.6	11.8	682.0	14.2	98
Tl362-023	边部	41	118	920	0.13	0.066 86	0.001 60	0.352 7	0.008 8	0.038 3	0.000 8	833.5	49.17	306.8	6.6	242.2	5.2	76
Tl362-024	核部	88	83	119	0.70	0.183 82	0.003 69	12.757 0	0.274 4	0.503 7	0.011 0	2 687.6	32.83	2 661.9	20.3	2 629.5	47.2	99
Tl362-025	边部	-	34	535	0.06	0.046 10	0.006 98	0.018 1	0.002 7	0.002 9	0.000 1	2.7	329.56	18.3	2.7	18.4	0.6	99
Tl362-026	边部	4	52	313	0.16	0.090 95	0.007 07	0.130 2	0.009 8	0.010 4	0.000 3	1 445.4	141.35	124.3	8.8	66.6	2.1	40
Tl362-027	核部	41	20	73	0.28	0.151 41	0.003 37	9.034 9	0.210 8	0.433 0	0.009 6	2 361.9	37.46	2 341.5	21.3	2 319.4	43.2	99
Tl362-028	核部	7	35	60	0.57	0.059 25	0.002 35	0.703 9	0.027 9	0.086 2	0.002 0	576.1	83.93	541.1	16.6	533.1	11.9	99
Tl362-029	核部	67	59	341	0.17	0.074 56	0.001 78	1.717 3	0.042 7	0.167 1	0.003 7	1 056.5	47.62	1 015.0	15.9	996.3	20.3	98

续表 1
Continued Table 1

样品号	分析位置	$w_B/10^{-6}$				Th/U	同位素比值				年龄/Ma				谐和度/%			
		Pb	Th	U	207Pb/206Pb		1σ	207Pb/235U	1σ	206Pb/238U	1σ	207Pb/206Pb	207Pb/235U	206Pb/238U				
Tl362-030	边部	-	40	211	0.19	0.051 02	0.035 00	0.014 5	0.009 8	0.002 1	0.000 3	241.9	1 096.70	14.7	9.8	13.3	1.6	90
Tl362-031	边部	29	176	1 568	0.11	0.223 23	0.007 44	0.297 0	0.009 4	0.009 7	0.000 2	3 004.1	52.57	264.0	7.3	61.9	1.4	-24
Tl362-032	边部	1	30	152	0.19	0.188 95	0.047 36	0.084 0	0.019 4	0.003 2	0.000 3	2 733.1	362.23	81.9	18.2	20.8	2.1	-19
Tl362-033	边部	1	37	516	0.07	0.065 33	0.010 25	0.020 4	0.003 1	0.002 3	0.000 1	785.0	299.11	20.5	3.1	14.6	0.6	66
Tl362-034	核部	122	213	1 077	0.20	0.080 69	0.001 91	1.053 3	0.024 8	0.094 7	0.001 9	1 213.9	45.84	730.5	12.3	583.3	11.4	78
Tl362-035	边部	2	40	275	0.15	0.155 12	0.017 68	0.079 8	0.008 5	0.003 7	0.000 2	2 403.2	181.80	77.9	8.0	24.0	1.1	-6
Tl362-036	边部	7	4 674	2 145	2.18	0.049 38	0.003 45	0.012 8	0.000 9	0.001 9	0.000 1	166.1	155.61	12.9	0.9	12.1	0.3	94
Tl362-037	边部	1	55	274	0.20	0.048 31	0.008 20	0.017 8	0.003 0	0.002 7	0.000 1	114.5	357.17	17.9	3.0	17.2	0.6	96
Tl362-038	核部	59	171	685	0.25	0.083 86	0.003 16	0.753 4	0.027 7	0.065 2	0.001 4	1 289.3	71.66	570.2	16.0	407.0	8.7	67
Tl362-039	核部	145	116	759	0.15	0.160 58	0.003 39	3.259 3	0.069 0	0.147 3	0.003 0	2 461.8	35.23	1 471.4	16.4	885.5	16.8	50
Tl362-040	核部	24	51	159	0.32	0.086 88	0.002 59	1.353 1	0.039 7	0.113 0	0.002 4	1 357.9	56.33	868.9	17.1	690.0	13.8	77
Tl362-041	边部	1	13	181	0.07	0.049 37	0.018 85	0.016 9	0.006 3	0.002 5	0.000 2	165.6	709.70	17.0	6.3	16.0	1.2	94
Tl362-042	核部	15	211	109	1.94	0.058 39	0.002 60	0.611 2	0.026 7	0.075 9	0.001 7	544.5	94.35	484.3	16.8	471.8	10.1	97
Tl362-043	边部	1	43	175	0.24	0.231 09	0.069 32	0.067 7	0.018 5	0.002 1	0.000 3	3 059.6	412.76	66.5	17.6	13.7	1.7	-32
Tl362-044	边部	1	51	249	0.20	0.049 57	0.016 67	0.014 4	0.004 8	0.002 1	0.000 1	175.0	639.17	14.5	4.8	13.5	0.9	93
Tl362-045	边部	0	43	171	0.25	0.127 14	0.032 26	0.035 3	0.008 5	0.002 0	0.000 2	2 058.8	390.55	35.2	8.3	13.0	1.1	8
Tl362-046	边部	2	43	862	0.05	0.104 66	0.010 81	0.023 8	0.002 4	0.001 7	0.000 1	708.3	178.95	23.9	2.3	10.6	0.4	23
Tl362-047	边部	10	2 020	5 259	0.38	0.052 34	0.005 66	0.009 7	0.001 0	0.001 3	0.000 0	300.3	229.17	9.8	1.0	8.6	0.3	87
Tl362-048	核部	42	67	459	0.15	0.071 03	0.001 74	0.752 4	0.018 3	0.076 8	0.001 6	958.2	49.25	569.6	10.6	477.2	9.4	82
Tl362-049	核部	168	255	1 668	0.15	0.108 27	0.002 41	1.142 1	0.025 4	0.076 5	0.001 6	1 770.5	40.24	773.5	12.0	475.3	9.3	52
Tl362-050	边部	3	182	1 204	0.15	0.085 44	0.014 26	0.019 2	0.003 1	0.001 6	0.000 1	1 325.4	293.06	19.3	3.1	10.5	0.5	41
Tl362-051	核部	140	187	1 017	0.18	0.085 87	0.001 93	1.313 6	0.029 5	0.111 0	0.002 3	1 335.2	42.89	851.7	12.9	678.3	13.1	77

表2 云母片岩的主量元素 ($w_B/\%$) 和微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 地球化学特征
Table 2 Major element ($w_B/\%$) and trace element ($w_B/10^{-6}$) data for the mica schist

岩石类型	T1362-D1	T1362-D2	T1362-D3	T1362-D4	T1362-D5	T1362-M1
SiO ₂	38.20	39.08	38.11	39.37	39.89	38.41
TiO ₂	0.22	0.18	0.26	0.22	0.23	0.09
Al ₂ O ₃	13.95	13.61	14.32	13.52	13.38	14.26
FeO	13.08	12.75	13.87	13.08	13.69	12.83
Fe ₂ O ₃	16.95	15.96	18.02	16.46	16.26	16.45
MnO	0.12	0.18	0.18	0.09	0.09	0.32
MgO	15.64	17.06	15.25	15.87	16.28	17.21
CaO	1.55	0.52	0.61	0.21	0.12	0.42
Na ₂ O	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
K ₂ O	8.25	8.37	8.67	9.60	9.66	6.09
P ₂ O ₅	0.10	0.06	0.11	0.07	0.09	0.08
H ₂ O ⁺	1.78	2.00	1.80	0.76	0.82	3.76
CO ₂	0.17	0.26	0.34	0.17	0.68	0.17
LOI	2.52	2.38	1.93	0.95	0.70	4.39
K ₂ O/Na ₂ O	825	837	867	960	966	609
FeO ^T	28.34	27.11	30.09	27.89	28.32	27.64
B	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	4.35
Be	1.50	1.28	1.13	1.06	1.27	1.59
Li	725	1 031	650	941	987	955
Sc	23.2	18.2	24.6	22.4	20.3	10.0
V	42.9	34.7	46.0	43.4	47.6	7.2
Cr	23.9	20.8	29.8	19.6	21.2	2.7
Ni	21.4	17.6	20.1	20.7	21.1	11.6
Co	10.30	10.60	11.50	9.93	6.66	9.21
Cu	0.22	0.54	0.66	0.53	0.42	0.82
Zn	125	247	193	79	84	322
Ga	121	133	129	129	128	148
Rb	2 449	2 298	2 647	2 773	2 740	1 649
Sr	5.91	2.51	1.60	1.16	1.26	2.19
Y	1.85	1.59	2.44	1.62	1.85	3.97
Zr	7.49	26.20	8.61	8.03	16.20	34.20
Nb	26.7	22.4	30.5	26.4	24.8	21.4
Mo	0.07	0.06	0.10	0.06	0.05	0.08
Cd	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
In	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05
Sn	5.02	4.35	5.82	4.86	4.40	4.63
Cs	209	195	219	229	212	98
Ba	66.8	103.0	74.7	96.4	108.0	31.8
La	0.32	0.15	0.12	0.13	0.14	5.51
Ce	0.45	0.32	0.30	0.31	0.28	13.10
Pr	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	1.37
Nd	0.35	0.23	0.31	0.25	0.29	5.35
Sm	0.21	0.17	0.23	0.18	0.22	1.74
Eu	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.12
Gd	0.29	0.22	0.35	0.24	0.29	1.74
Tb	0.05	0.05	0.07	0.05	0.06	0.26
Dy	0.26	0.21	0.32	0.22	0.24	1.03
Ho	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.15
Er	0.11	0.10	0.15	0.10	0.11	0.35
Tm	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Yb	0.09	0.11	0.13	0.10	0.12	0.26
Lu	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Hf	0.27	0.88	0.33	0.31	0.61	1.74
Ta	5.09	4.70	5.82	4.98	4.61	2.68
W	0.22	0.22	0.13	0.10	0.09	0.23
Tl	10.9	10.2	12.1	11.8	10.3	5.7
Pb	0.96	0.99	0.24	0.40	0.67	437.00
Bi	0.05	0.05	0.05	0.08	0.07	14.40
Th	0.06	0.24	0.05	0.08	0.07	2.75
U	0.25	0.38	0.23	0.20	0.33	24.90
Mn	922	1 446	1 403	684	704	2 571
Sb	0.07	0.08	0.09	0.05	0.05	0.13
Ti	1 300	1 094	1 510	1 333	1 320	462
As	0.10	0.46	0.31	0.09	0.25	1.03
Nb/Ta	5.25	4.77	5.24	5.30	5.38	7.99
Zr/Hf	27.74	29.77	26.09	25.90	26.56	19.66
Rb/Sr	414	916	1 654	2 391	2 175	753
ΣREE	2.4	1.8	2.2	1.8	2.0	31.1

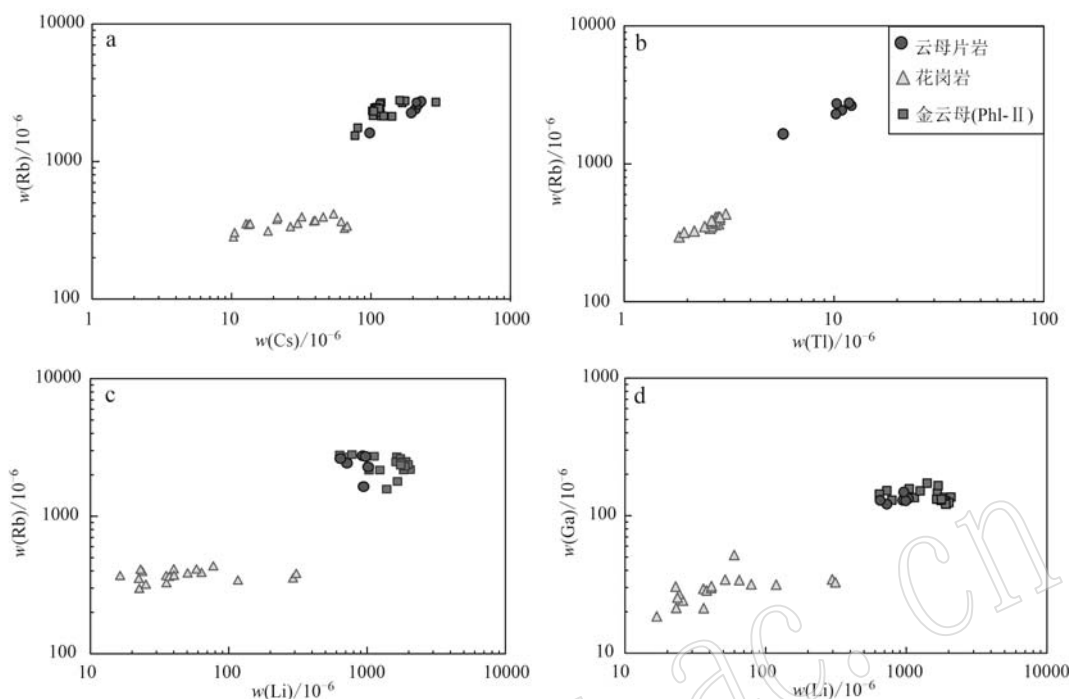


图5 云母片岩、洛扎淡色花岗岩(数据未发表)和金云母中关键金属 Li-Rb-Cs-Tl-Ga 的富集特征

Fig. 5 The characteristics of critical elements Li-Rb-Cs-Tl-Ga enrichment in the mica schist, leucogranites (unpublished data) and phlogopite in the Luozha area

3.3 金云母的主、微量元素地球化学特征

云母和绿泥石单矿物主量元素电子探针分析结果见表3。从云母的形态和主量元素地球化学成分来看,云母片岩中含有两类金云母,在此将鳞片状金云母命名为 Phl-I,片状金云母命名为 Phl-II。两类金云母都含有较高含量的 Al_2O_3 (10.953% ~ 17.188%)、 K_2O (7.448% ~ 9.874%)、 TiO_2 (0.010% ~ 0.793%),但较低含量的 SiO_2 (36.649% ~ 44.726%)、 CaO (<0.1%)、 Na_2O (<1.6%)。不同的是,Phl-I 含有较高的 FeO (11.753% ~ 18.014%),较低的 MgO (13.853% ~ 18.933%),而 Phl-II 含有较高的 MgO (25.480% ~ 26.596%) 和低的 FeO (<1.4%) (图6)。Tindle 和 Webb (1990) 发现三八面体型云母中 SiO_2 与 Li_2O 含量呈正比,云母的 Li_2O 含量可以使用下列经验公式进行计算: $\text{Li}_2\text{O} = 0.287 \text{ SiO}_2 - 9.552$ 。利用这个公式对本文金云母进行计算,结果得到两类金云母都含有较高含量的 Li_2O (0.97% ~ 3.28%)。

利用 LA-ICP-MS 对 Phl-II 进行的微量元素分析结果(表4)与全岩中关键金属含量相似,Phl-II 富集 Li (643.01×10^{-6} ~ 2069.74×10^{-6})、Rb ($1577.08 \times$

10^{-6} ~ 2825.58×10^{-6})、Cs (77.08×10^{-6} ~ 292.84×10^{-6})、Ga (120.58×10^{-6} ~ 171.72×10^{-6}) (图5),但 Nb ($\leq 35.48 \times 10^{-6}$)、Ta ($\leq 7.04 \times 10^{-6}$)、Be ($\leq 41.61 \times 10^{-6}$)、B ($\leq 37.24 \times 10^{-6}$)、W ($\leq 0.81 \times 10^{-6}$)、Sn ($\leq 20.0 \times 10^{-6}$) 含量很低。原位测试的 Li 含量换算成 Li_2O 为 0.14% ~ 0.44%。通过实际测量和公式计算结果的对比可以得出,公式计算的 Li_2O 含量 (2.16% ~ 2.78%) 偏高,不可信。

根据云母族矿物分类图解(图7c、7d),Phl-II 属于金云母。在 $\text{Fe}+\text{Mg}+\text{Ti}-\text{Al}^{\text{VI}}$ 和 $(\text{Mg}-\text{Li})$ 的关系图解(图7b)中,Phl-I 落入富镁黑云母区域中,但考虑到大部分 Phl-I 中 $\text{Mg}:\text{Fe}^* > 2$ (图7a),而且公式计算的 Li 含量偏高,所以 Phl-I 也应该属于金云母。

4 讨论

从上文地球化学数据可以看出,云母片岩具有含量较高的 Al_2O_3 、 K_2O 、 FeO^{T} 、 MgO 和 TiO_2 ,富集关键金属 Li-Rb-Cs-Tl-Ga。稀有金属,包括锂(Li)、铷(Rb)、铯(Cs)、铍(Be)、铌(Nb)、钽(Ta)、锆(Zr)、铪(Hf)、钨(W)、锡(Sn)等。锂为亲石元素,地壳丰

表 3 单矿物的主量元素地球化学特征
Table 3 Major element data for the minerals

测试点位 矿物	Line 1																$w_h/\%$
	Phl-I	Phl-I	Phl-I	Chl	Chl	Phl-II	Phl-II	Phl-II	Phl-II	Phl-II	Phl-II	Phl-II	Phl-II	Phl-I	Phl-I	Phl-I	
SiO ₂	39.894	39.924	39.88	27.296	26.956	41.695	40.821	41.286	41.621	41.636	36.649	42.666	42.537	42.706	42.706	44.726	
TiO ₂	0.233	0.165	0.145	0.059	0.007	0.510	0.555	0.615	0.707	0.691	0.538	0.158	0.211	0.139	0.139	0.123	
Al ₂ O ₃	13.898	13.559	13.316	19.434	19.546	15.215	15.944	15.469	15.283	15.228	17.188	11.887	12.127	11.789	11.789	10.871	
FeO	16.728	17.512	16.009	24.128	24.887	0.588	0.570	1.400	0.486	0.428	17.03	12.848	12.879	13.602	13.602	11.753	
MnO	0.118	0.135	0.055	0.774	0.563	0.021	0.009	-	-	0.004	0.113	0.165	0.150	0.146	0.146	0.147	
MgO	14.56	14.654	16.072	15.957	15.849	26.596	26.418	25.559	26.156	26.413	13.853	17.678	17.859	17.517	17.517	18.734	
CaO	-	0.002	-	0.034	-	-	-	0.014	0.041	0.017	-	0.009	0.002	-	-	-	
Na ₂ O	0.053	0.096	0.087	0.133	0.046	1.075	1.02	1.017	1.081	1.086	0.118	0.069	0.084	0.060	0.060	0.044	
K ₂ O	9.805	9.574	9.874	0.808	0.485	8.910	8.840	8.872	8.808	8.744	9.808	9.493	9.473	9.395	9.395	9.411	
Cr ₂ O ₃	0.029	0.047	-	0.043	0.031	0.044	0.009	-	0.035	0.094	-	0.020	-	0.015	-	-	
NiO	-	0.022	0.050	-	-	0.045	-	-	0.053	-	-	0.014	0.064	0.019	0.019	0.036	
SUM	95.32	95.69	95.49	88.67	88.37	94.70	94.19	94.23	94.27	94.34	95.30	95.01	95.39	95.39	95.39	95.85	
Li ₂ O*	1.90	1.91	1.89	-	-	2.41	2.16	2.30	2.39	2.40	0.97	2.69	2.66	2.70	2.70	3.28	
Si	5.825	5.825	5.805	-	-	5.632	5.560	5.628	5.641	5.635	5.455	6.040	6.004	6.038	6.038	6.172	
Al ^{IV}	2.175	2.175	2.195	-	-	2.368	2.440	2.372	2.359	2.365	2.545	1.960	1.996	1.962	1.962	1.768	
Al ^{VI}	0.218	0.157	0.089	-	-	0.054	0.120	0.113	0.082	0.064	0.471	0.024	0.021	0.003	0.003	0.000	
Ti	0.026	0.018	0.016	-	-	0.052	0.057	0.063	0.072	0.070	0.060	0.017	0.022	0.015	0.015	0.013	
Cr	0.003	0.005	0.000	-	-	0.005	0.001	0.000	0.004	0.010	0.000	0.002	0.000	0.002	0.002	0.000	
Fe	2.043	2.137	1.949	-	-	0.066	0.065	0.160	0.055	0.048	2.120	1.521	1.520	1.608	1.608	1.356	
Mn	0.015	0.017	0.007	-	-	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.014	0.020	0.018	0.017	0.017	0.017	
Mg	3.169	3.187	3.487	-	-	5.355	5.364	5.193	5.284	5.329	3.074	3.731	3.758	3.692	3.692	3.854	
Zn	0.000	0.000	0.000	-	-	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Sn	0.000	0.000	0.000	-	-	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Ga	0.000	0.000	0.000	-	-	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Ni	0.000	0.003	0.006	-	-	0.005	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000	0.002	0.007	0.002	0.002	0.004	
Cu	0.000	0.000	0.000	-	-	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Li*	1.114	1.119	1.109	-	-	1.312	1.185	1.259	1.305	1.305	0.578	1.533	1.508	1.538	1.538	1.823	
Al ^{total}	2.392	2.332	2.285	-	-	2.422	2.560	2.485	2.441	2.429	3.016	1.983	2.017	1.965	1.965	1.768	
Fe/Fe+Mg	0.392	0.401	0.358	-	-	0.012	0.012	0.030	0.010	0.009	0.408	0.290	0.288	0.303	0.303	0.260	

续表 3-1
Continued Table 3-1

测试点位		Line 2													
矿物	Phl- I	Phl- I	Phl- I	Phl- I	Chl	Phl- II	Phl- II	Phl- II	Phl- II	Chl	Phl- II	Phl- II	Chl	Phl- I	Phl- I
SiO ₂	42.762	42.595	42.454	27.768	29.063	41.896	42.035	41.888	42.175	26.043	42.332	41.478	26.045	43.701	43.062
TiO ₂	0.107	0.145	0.010	0.014	0.063	0.739	0.698	0.638	0.683	0.021	0.630	0.175	—	0.135	0.153
Al ₂ O ₃	10.953	11.764	11.302	18.593	17.672	15.150	15.001	15.349	15.015	20.414	14.994	13.352	20.187	11.717	12.035
FeO	13.873	13.604	14.358	23.163	21.859	0.419	0.383	0.550	0.417	27.596	0.606	14.601	27.211	12.649	13.512
MnO	0.120	0.130	0.137	0.328	0.266	—	—	0.014	0.003	0.621	0.008	0.210	0.719	0.147	0.150
MgO	18.287	17.470	18.109	17.909	17.822	25.861	26.201	26.061	26.326	13.623	26.278	16.514	14.485	17.927	17.718
CaO	0.009	—	—	—	0.022	0.017	0.021	0.026	0.028	—	0.027	0.029	—	0.021	0.018
Na ₂ O	0.069	0.078	0.034	0.034	0.044	1.383	1.412	1.352	1.396	0.044	1.391	0.073	0.020	0.057	0.064
K ₂ O	9.492	9.474	9.466	0.249	1.225	8.148	8.320	8.295	8.304	0.319	8.271	9.071	0.214	9.383	9.233
Cr ₂ O ₃	0.031	0.015	0.010	0.059	0.020	0.039	0.008	0.043	0.001	0.063	0.007	0.014	0.015	0.039	0.014
NiO	—	0.010	0.022	0.007	—	—	0.012	—	0.053	0.039	0.025	—	0.034	—	—
SUM	95.70	95.29	95.90	88.12	88.06	93.65	94.09	94.22	94.40	88.78	94.57	95.52	88.93	95.78	95.96
Li ₂ O *	2.72	2.67	2.63	—	—	2.47	2.51	2.47	2.55	—	2.60	2.35	—	2.99	2.81
Si	6.044	6.036	6.010	—	—	5.684	5.681	5.659	5.679	—	5.689	5.908	—	6.090	6.030
Al ^{IV}	1.825	1.964	1.886	—	—	2.316	2.319	2.341	2.321	—	2.311	2.092	—	1.910	1.970
Al ^{VI}	0.000	0.001	0.000	—	—	0.106	0.070	0.103	0.062	—	0.064	0.149	—	0.015	0.017
Ti	0.011	0.015	0.001	—	—	0.075	0.071	0.065	0.069	—	0.064	0.019	—	0.014	0.016
Cr	0.003	0.002	0.001	—	—	0.004	0.001	0.005	0.000	—	0.001	0.002	—	0.004	0.002
Fe	1.640	1.612	1.700	—	—	0.048	0.043	0.062	0.047	—	0.068	1.739	—	1.474	1.582
Mn	0.014	0.016	0.016	—	—	0.000	0.000	0.002	0.000	—	0.001	0.025	—	0.017	0.018
Mg	3.853	3.690	3.821	—	—	5.230	5.278	5.249	5.285	—	5.264	3.506	—	3.724	3.699
Zn	0.000	0.000	0.000	—	—	0.000	0.000	0.000	0.000	—	0.000	0.000	—	0.000	0.000
Sn	0.000	0.000	0.000	—	—	0.000	0.000	0.000	0.000	—	0.000	0.000	—	0.000	0.000
Ga	0.000	0.000	0.000	—	—	0.000	0.000	0.000	0.000	—	0.000	0.000	—	0.000	0.000
Ni	0.000	0.001	0.003	—	—	0.000	0.001	0.000	0.006	—	0.003	0.000	—	0.000	0.000
Cu	0.000	0.000	0.000	—	—	0.000	0.000	0.000	0.000	—	0.000	0.000	—	0.000	0.000
Li *	1.547	1.523	1.499	—	—	1.349	1.365	1.342	1.382	—	1.404	1.347	—	1.676	1.581
Al ^{total}	1.825	1.965	1.886	—	—	2.423	2.390	2.444	2.383	—	2.375	2.241	—	1.925	1.986
Fe/Fe+Mg	0.299	0.304	0.308	—	—	0.009	0.008	0.012	0.009	—	0.013	0.332	—	0.284	0.300

续表 3-2
Continued Table 3-2

测试点位 矿物	Line 3										Line 4			
	Phl- I	Phl- I	Chl	Phl- II	Phl- II	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Phl- I	Phl- I	Phl- I	Phl- I
SiO ₂	39.270	42.390	30.739	25.807	42.981	42.794	25.192	28.158	25.732	25.940	43.015	41.669	43.673	37.947
TiO ₂	0.187	—	0.032	—	0.793	0.671	0.028	0.050	—	—	0.098	0.228	0.016	0.446
Al ₂ O ₃	13.992	11.473	17.229	19.932	15.207	16.020	20.684	19.171	20.329	20.048	11.990	12.524	10.880	16.133
FeO	18.014	14.095	20.441	28.079	0.523	0.465	27.873	23.238	27.141	27.060	13.192	13.982	13.146	15.996
MnO	0.099	0.110	0.272	0.652	0.022	—	0.620	0.326	0.701	0.785	0.175	0.157	0.118	0.139
MgO	14.104	18.933	17.992	13.711	26.538	25.973	13.848	17.210	13.861	14.342	17.710	17.250	18.662	15.016
CaO	0.027	—	0.001	—	—	—	0.022	0.016	0.033	0.002	—	0.058	—	—
Na ₂ O	0.114	0.088	0.040	0.053	1.639	1.620	0.023	0.020	0.025	0.041	0.067	0.061	0.046	0.091
K ₂ O	9.489	8.307	2.282	0.018	7.597	7.448	0.029	0.512	0.301	0.118	9.504	9.677	9.452	9.840
Cr ₂ O ₃	0.033	0.030	0.042	—	0.046	0.033	0.037	0.024	0.006	0.023	—	0.025	—	—
NiO	—	—	0.020	0.024	—	—	—	—	0.001	0.017	0.021	—	—	—
SUM	95.33	95.43	89.09	88.28	95.35	95.02	88.36	88.73	88.13	88.38	95.77	95.63	95.99	95.61
Li ₂ O *	1.72	2.61	—	—	2.78	2.73	—	—	—	—	2.79	2.41	2.98	1.34
Si	5.782	5.984	—	—	5.691	5.676	—	—	—	—	6.038	5.932	6.097	5.565
Al ^{IV}	2.218	1.909	—	—	2.309	2.324	—	—	—	—	1.962	2.068	1.790	2.435
Al ^{VI}	0.210	0.000	—	—	0.065	0.180	—	—	—	—	0.022	0.034	0.000	0.353
Ti	0.021	0.000	—	—	0.079	0.067	—	—	—	—	0.010	0.024	0.002	0.049
Cr	0.004	0.003	—	—	0.005	0.003	—	—	—	—	0.000	0.003	0.000	0.000
Fe	2.218	1.664	—	—	0.058	0.052	—	—	—	—	1.549	1.665	1.535	1.962
Mn	0.012	0.013	—	—	0.002	0.000	—	—	—	—	0.021	0.019	0.014	0.017
Mg	3.096	3.984	—	—	5.238	5.135	—	—	—	—	3.706	3.661	3.884	3.282
Zn	0.000	0.000	—	—	0.000	0.000	—	—	—	—	0.000	0.000	0.000	0.000
Sn	0.000	0.000	—	—	0.000	0.000	—	—	—	—	0.000	0.000	0.000	0.000
Ga	0.000	0.000	—	—	0.000	0.000	—	—	—	—	0.000	0.000	0.000	0.000
Ni	0.000	0.000	—	—	0.000	0.000	—	—	—	—	0.002	0.000	0.000	0.000
Cu	0.000	0.000	—	—	0.000	0.000	—	—	—	—	0.000	0.000	0.000	0.000
Li *	1.018	1.484	—	—	1.482	1.456	—	—	—	—	1.577	1.378	1.674	0.790
Al _{total}	2.428	1.909	—	—	2.373	2.504	—	—	—	—	1.984	2.102	1.790	2.789
Fe/Fe+Mg	0.417	0.295	—	—	0.011	0.010	—	—	—	—	0.295	0.313	0.283	0.374

续表 3-3
Continued Table 3-3

测试点位 矿物	Line 4										Line 5									
	Phl-II	Phl-II	Phl-I	Phl-I	Phl-I	Phl-I	Phl-I	Phl-I	Phl-I	Chl	Phl-II	Phl-I	Phl-I	Phl-I	Phl-I	Phl-I	Phl-I	Phl-I	Phl-I	Phl-I
SiO ₂	42.815	41.802	40.386	43.029	41.135	43.957	42.399	43.249	42.839	25.890	41.813	43.170	42.460	41.998						
TiO ₂	0.711	0.718	0.171	0.146	0.184	0.142	0.231	0.205	0.117	0.021	0.628	0.182	0.188	0.218						
Al ₂ O ₃	15.363	16.033	13.844	11.839	13.210	11.986	12.375	11.524	11.490	19.825	16.205	11.697	12.291	12.698						
FeO	0.382	0.557	15.951	12.534	15.196	13.063	12.552	13.348	13.767	26.691	0.617	12.763	13.121	13.518						
MnO	—	—	0.132	0.154	0.212	0.158	0.186	0.133	0.168	0.746	0.032	0.189	0.193	0.172						
MgO	25.597	25.480	15.809	17.981	17.749	17.750	17.806	17.443	17.719	14.648	25.553	17.966	17.606	17.198						
CaO	0.040	0.074	0.012	0.012	0.022	—	0.006	0.008	0.008	—	—	0.042	—	0.020						
Na ₂ O	1.534	1.473	0.058	0.056	0.062	0.066	0.059	0.047	0.063	—	1.594	0.073	0.068	0.065						
K ₂ O	7.758	7.952	9.570	9.491	7.953	9.269	9.803	9.380	9.409	0.019	8.070	9.528	9.624	9.747						
Cr ₂ O ₃	—	0.021	—	—	—	0.005	—	—	0.048	0.011	0.003	0.031	0.019	0.046						
NiO	0.030	—	—	0.035	—	—	0.018	—	0.021	0.019	—	0.022	0.001	—						
SUM	94.23	94.11	95.93	95.28	95.72	96.40	95.44	95.34	95.65	87.87	94.52	95.66	95.57	95.68						
Li ₂ O *	2.74	2.45	2.04	2.80	2.25	3.06	2.62	2.86	2.74		2.45	2.84	2.63	2.50						
Si	5.731	5.642	5.815	6.053	5.841	6.083	5.986	6.090	6.045		5.627	6.055	5.994	5.951						
Al ^{IV}	2.269	2.358	2.185	1.947	2.159	1.917	2.014	1.910	1.911		2.373	1.934	2.006	2.049						
Al ^{VI}	0.156	0.193	0.164	0.016	0.052	0.038	0.046	0.002	0.000		0.198	0.000	0.039	0.072						
Ti	0.072	0.073	0.019	0.015	0.020	0.015	0.025	0.022	0.012		0.064	0.019	0.020	0.023						
Cr	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.005		0.000	0.003	0.002	0.005						
Fe	0.043	0.063	1.921	1.475	1.805	1.512	1.482	1.572	1.625		0.069	1.497	1.549	1.602						
Mn	0.000	0.000	0.016	0.018	0.025	0.019	0.022	0.016	0.020		0.004	0.022	0.023	0.021						
Mg	5.108	5.127	3.393	3.770	3.757	3.662	3.748	3.661	3.727		5.126	3.756	3.705	3.633						
Zn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000						
Sn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000						
Ga	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000						
Ni	0.003	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.002	0.000	0.002		0.000	0.002	0.000	0.000						
Cu	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000						
Li *	1.473	1.327	1.181	1.583	1.287	1.705	1.486	1.620	1.557		1.325	1.601	1.496	1.426						
Al _{total}	2.424	2.551	2.349	1.963	2.211	1.955	2.059	1.913	1.911		2.571	1.934	2.045	2.121						
Fe/Fe+Mg	0.008	0.012	0.361	0.281	0.324	0.292	0.283	0.300	0.304		0.013	0.285	0.295	0.306						

注：* 为计算值。

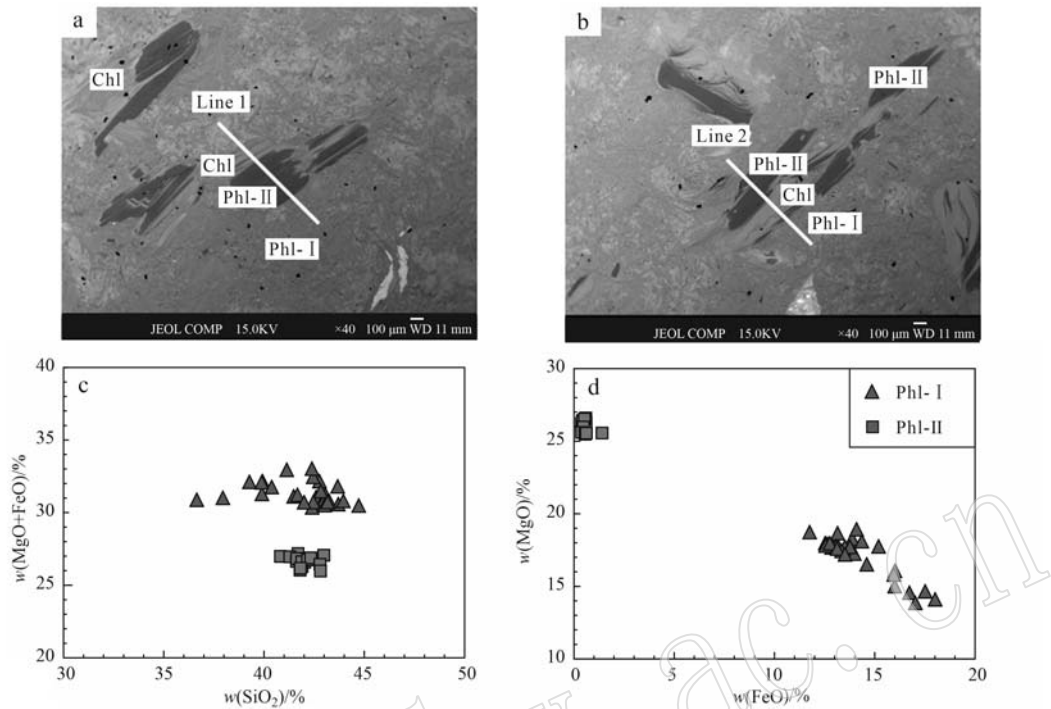


图 6 金云母的背散射图像(a,b)和矿物成分特征(c,d)
Fig. 6 BSE images(a, b) and composition of phlogopite (c, d)
Phl—金云母; Chl—绿泥石
Phl—phlogopite; Chl—chlorite

表 4 云母的微量元素地球化学分析结果
Table 4 Trace element data for the mica

$w_B/10^{-6}$

	Li	Rb	Cs	Ga	Be	B	W	Sn	Nb	Ta
T1362-1	1 657.40	2 721.85	118.54	145.83	22.51	7.22	0.10	3.17	25.14	3.35
T1362-2	1 761.62	2 503.42	112.37	131.38	4.99	13.22	0.23	1.72	26.27	3.12
T1362-3	1 653.89	2 522.95	112.37	131.28	7.21	37.24	0.13	3.55	21.52	2.86
T1362-4	1 757.49	2 648.30	116.21	128.34	0.00	0.00	0.26	1.08	13.48	1.19
T1362-5	1 862.15	2 491.61	106.51	135.27	0.00	0.00	0.10	2.42	25.01	3.08
T1362-6	1 924.03	2 517.69	109.26	130.85	8.95	0.00	0.10	2.22	26.08	3.23
T1362-7	1 137.99	2 746.49	292.84	134.70	16.60	0.00	0.81	20.00	81.71	4.39
T1362-8	2 069.74	2 196.52	103.98	135.97	41.61	0.17	0.00	2.18	10.47	1.29
T1362-9	1 762.65	2 422.25	107.67	128.60	9.12	5.58	0.10	3.48	28.82	3.83
T1362-10	724.65	2 713.36	168.13	151.70	12.77	21.90	0.13	5.16	35.48	7.04
T1362-11	1 637.03	2 494.34	111.44	131.17	0.00	3.73	0.10	2.18	26.78	3.51
T1362-12	643.01	2 804.66	176.01	142.98	12.29	0.00	0.21	5.12	23.49	4.51
T1362-13	1 920.77	2 371.69	102.53	120.58	0.00	0.00	0.16	2.36	26.44	3.25
T1362-14	1 898.45	2 372.85	108.10	127.29	0.00	0.00	0.29	2.46	26.09	3.41
T1362-15	1 857.29	2 179.33	118.61	128.02	0.00	1.43	0.13	3.07	13.66	2.08
T1362-16	1 045.88	2 170.37	141.98	156.47	0.00	4.67	0.03	1.68	9.16	1.47
T1362-17	2 000.61	2 391.37	108.92	123.69	23.35	11.31	0.14	3.17	10.36	0.92
T1362-18	788.58	2 825.58	161.16	129.11	0.00	0.00	0.15	2.38	22.94	3.54
T1362-19	1 895.75	2 314.10	117.07	120.73	1.85	6.67	0.16	2.70	18.57	2.33
T1362-20	1 770.07	2 465.91	114.62	129.22	0.00	3.99	0.09	2.78	12.44	1.11
T1362-21	1 677.68	1 795.24	80.72	164.86	20.02	21.72	0.21	2.54	24.66	2.43
T1362-22	1 251.90	2 178.05	123.73	150.87	0.00	0.00	0.12	6.05	24.04	3.27
T1362-23	1 769.79	2 367.88	105.09	131.12	0.00	1.18	0.11	3.60	26.93	3.31
T1362-24	1 403.11	1 577.08	77.08	171.72	0.00	20.53	0.09	2.73	11.40	1.98

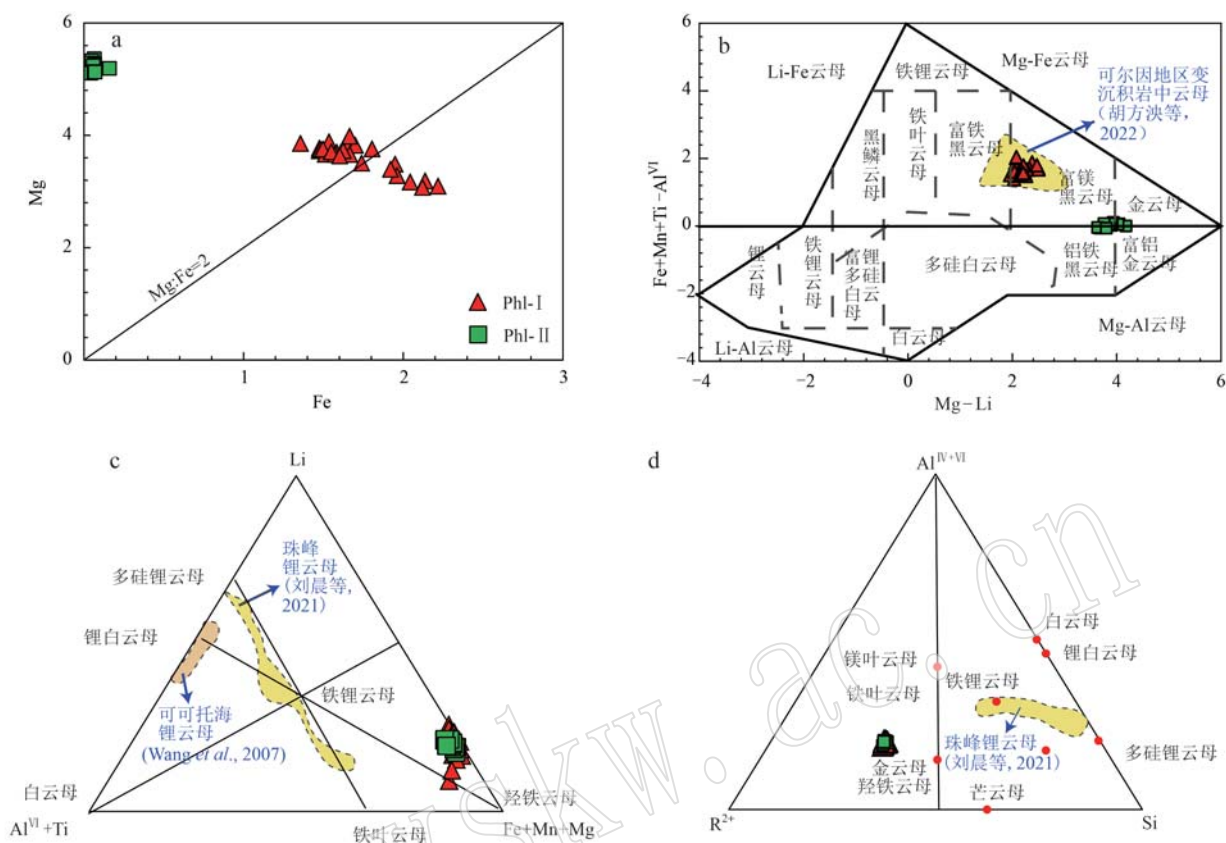


图7 云母族矿物分类图(b据 Tischendorf *et al.*, 1997; c据 Rieder *et al.*, 1997; d据 Monier and Robert, 1986)

Fig. 7 Classification of mica (b after Tischendorf *et al.*, 1997; c after Rieder *et al.*, 1997; d after Monier and Robert, 1986)

度为 20×10^{-6} 。随着近 10 年来新能源汽车产业“超常”的快速发展,国内外对于锂矿的关注度异乎寻常,锂被称为“白色石油”、“21 世纪能源金属”等(王登红等, 2022)。经过 10 年来的勘查实践与理论研究,中国锂矿的研究成果丰硕,成矿区带从 12 个增加到 16 个。铷为亲石分散元素,地壳丰度为 90×10^{-6} 。除应用于军工部门和科学技术领域外,铷还应用于众多民用领域,比如光学技术、合成催化和特殊玻璃陶瓷业。除个别独立矿物外,铷主要分散在锂云母、铁锂云母、铯榴石、盐矿层和矿泉中(赵振华等, 2020)。我国铷资源主要赋存于锂云母和盐湖卤水中,锂云母中铷含量占全国铷资源储量的 55%,以江西宜春储量最为丰富,是我国铷矿产品的主要来源。铷还可以与钾呈类质同象形式赋存于天河石、钾盐和光卤石等含钾矿物中。孙艳(2013)提出,在勘查开发中应以寻找高品位云母型铷矿为勘查重点。铯为亲石分散元素,地壳丰度为 3×10^{-6} 。铯在

离子半径等地球化学性质上与钾和铷接近,故常存在于富钾矿物中,特别是在长石和云母等含钾矿物中以类质同象形式存在。在花岗伟晶岩中,含铯矿物常与锂辉石、锂云母、电气石以及铌钽矿物共生。铯含量一般随着岩浆分异程度增强而增加,容易富集于岩浆晚期阶段的碱性岩和花岗伟晶岩中。

稀散金属,包括铊(Tl)、镓(Ga)等 8 种元素。稀散金属对高科技和未来能源的发展具有举足轻重的地位,被很多西方发达国家当作 21 世纪的战略物资。稀散金属在地壳中丰度极低(多为 10^{-9} 量级),在岩石中极为分散,这一内在特征决定了稀散金属富集成矿需要特殊的成矿条件。目前,对稀散金属成矿的研究还十分薄弱,极大地制约了稀散矿产资源的理论认识和找矿突破(温汉捷等, 2020)。镓是一种低熔点高沸点的稀散金属,被称为“电子工业脊梁”,随着镓在太阳能电池行业应用的快速发展,未来金属镓需求还将快速增长(Frenzel *et al.*, 2016; 温

① 本文所有元素的地壳丰度来自于 Kenneth B. Periodic Table of Elements. Environmental Chemistry. com. 1995~2022.

汉捷等, 2020)。镓的地壳丰度为 18×10^{-6} , 很少形成独立矿物, 主要是以伴生金属的形式存在。世界上富镓矿床大致分为风化-沉积型矿床、热液型矿床、伟晶岩型矿床和岩浆型矿床(温汉捷等, 2020)。氧化条件下镓地球化学性质与铝和铁相似, 具强亲石性。在伟晶岩型矿床中, 镓赋存于锂辉石、锂云母、白云母、长石等中, 比如江西武功山附近的花岗伟晶岩。铊在光导纤维、辐射闪烁器、光学透位、辐射屏蔽材料、催化剂和超导材料等方面具有不可替代性。铊的地壳丰度为 0.6×10^{-6} , 岩浆过程中铊主要呈类质同象形式替代钾、铷进入云母和钾长石(Rader *et al.*, 2018)。目前为止铊成矿的研究相对比较薄弱, 尚无公认的矿床类型, 根据元素组合、赋存状态和成矿条件等差异, 温汉捷等(2020)将铊矿大致划分出两个具有工业意义的矿床类型, 即低温热液型铊矿床和块状硫化物型含铊矿床。

世界上锂矿床成因类型主要有卤水型、花岗伟晶岩及花岗岩型、沉积型3种(王登红等, 2022)。综合以上稀有金属 Li-Rb-Cs 和 11 种分散金属 Tl-Ga 的地球化学特征, 可以看出 Li-Rb-Cs-Tl-Ga 都可以赋存于云母类中。可可托海三号脉中富锂的云母矿物为锂白云母(图 7c, Wang *et al.*, 2007), 喜马拉雅造山带珠峰地区伟晶岩中富锂的云母矿物为铁锂云母(图 7d, 刘晨等, 2021), 本文中的富锂矿物为金云母, 与花岗伟晶岩及花岗岩型不同。

沉积型锂矿的产出多与黏土岩、湖泊沉积物等有关(金中国等, 2022)。我国贵州铝土矿资源丰富, 并伴生大量的 Li、Ga 等三稀元素(龙珍等, 2021)。特提斯喜马拉雅沉积岩系是一套连续出露的浅变质-不变质海相碎屑岩和碳酸盐岩沉积序列。新生代花岗岩中经常可以见到围岩捕虏体, 表明淡色花岗岩侵位过程中可以捕虏特提斯喜马拉雅沉积岩系。从锆石 CL 图(图 4a)上可以看出, 云母片岩中的锆石粒度小, 为浑圆状, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布范围很广(图 4b), 属于碎屑锆石。18.4 ~ 16.0 Ma 和 13.5 ~ 12.1 Ma 两期变质事件(图 4c)正好对应于洛扎地区新生代的 20~15 Ma 和 12 Ma 两期岩浆活动(Edwards and Harrison, 1997; Huang *et al.*, 2017), 所以可以认为洛扎地区云母片岩的原岩为沉积岩, 在淡色花岗岩侵位过程中该沉积岩被捕虏而发生了低级变质作用。松潘-甘孜构造带东部可尔因地区变沉积岩围岩中富锂矿物为黑云母(图 7b, 胡方决等, 2022), 花岗-伟晶岩型锂矿的围岩变沉积岩富

集锂, 是受到富锂熔-流体的改造而成。而本文云母片岩中的 Li-Rb-Cs-Tl-Ga 以类质同象形式替代 K 进入金云母, 与沉积型锂矿的成因也不同, 所以, 我们认为洛扎地区富集锂等关键金属元素的云母片岩是锂矿成因的新类型: 变质改造型。

我们团队曾在吉隆、亚东发现侵入到藏南拆离系的部分中新世淡色花岗岩富集关键金属 W、Sn、B、Be、Cs、Tl 等, Sn、Cs、Tl、Be 元素变化范围分别为 $1.69 \times 10^{-6} \sim 55.20 \times 10^{-6}$ 、 $14.6 \times 10^{-6} \sim 126.0 \times 10^{-6}$ 、 $1.05 \times 10^{-6} \sim 4.97 \times 10^{-6}$ 和 $6.71 \times 10^{-6} \sim 184 \times 10^{-6}$ (高利娥等, 2021)。与其相比, 洛扎云母片岩中 Cs($98 \times 10^{-6} \sim 229 \times 10^{-6}$)、Tl($5.7 \times 10^{-6} \sim 12.1 \times 10^{-6}$) 富集程度更高, 并且还富集 Ga($121 \times 10^{-6} \sim 148 \times 10^{-6}$)、Li($650 \times 10^{-6} \sim 1031 \times 10^{-6}$)、Rb($1649 \times 10^{-6} \sim 2773 \times 10^{-6}$), 可以形成关键金属矿体。喜马拉雅造山带变沉积岩富集稀散金属铊和镓, 表明该地区除了稀有金属元素, 稀散金属也有成矿潜力, 是我国未来关键金属矿产勘探的又一重要方向。鉴于战略性新兴产业快速发展对于关键金属资源的刚性需求, 我们建议加强喜马拉雅造山带沉积岩和变沉积岩中 Li-Cs-Tl-Rb-Ga 等关键金属的调查和研究。

5 结论与展望

洛扎地区被含电气石淡色花岗岩捕虏的云母片岩富集关键金属 Li-Rb-Cs-Tl-Ga, 其中金云母成矿作用是锂矿成因的新类型: 变质改造型。喜马拉雅造山带洛扎云母片岩关键金属的富集程度比淡色花岗岩中关键金属元素富集程度更高, 可以形成关键金属矿体。喜马拉雅造山带变沉积岩富集稀散金属铊和镓的发现, 表明该地区是我国未来关键金属矿产勘探的又一重要靶区。本文为建立喜马拉雅造山带关键金属的成矿模型提供了新的思路, 未来需要加强该区域和其他造山带变沉积岩中关键金属成矿潜力的调查和研究。

致谢 成文过程中与中国地质科学院地质研究所成学祥研究员进行了有益的探讨, 电子探针分析得到中国地质科学院地质研究所毛小红助理研究员的协助, 董昕研究员和胡古月副研究员仔细审阅稿件, 提出众多建设性修改意见, 在此一并表示衷心的感谢。

References

- Edwards M A and Harrison T M. 1997. When did the roof collapsed? Late Miocene north-south extension in the high Himalaya revealed by Th-Pb monazite dating of the Khula Kangri granite [J]. *Geology*, 25: 543~546.
- Frenzel M, Hirsch T and Gutzmer J. 2016. Gallium, germanium, indium, and other trace and minor elements in sphalerite as a function of deposit type—A meta-analysis [J]. *Ore Geology Reviews*, 76: 52~78
- Gao Li'e, Zeng Lingsen, Gao Jiahao, *et al.* 2021. Abnormality of critical minerals Sn-Cs-Tl in the Himalaya leucogranite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(10): 2 923~2 943 (in Chinese with English abstract)
- Hou Zengqian, Chen Jun and Zhai Mingguo. 2020. Current status and frontiers of research on critical mineral resources [J]. *Chinese Science Bulletin*, 65: 3 651~3 652 (in Chinese)
- Hu Fangyang, Wu Fuyuan, Chen Guohui, *et al.* 2022. The critical factors of lithium enrichment in the metasedimentary wall rocks of granitic pegmatite-type lithium deposit: Insights from the Ke'erlyn area in the eastern Songpan-Ganzi Belt [J/OL]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(7): 2 017~2 051 (in Chinese with English abstract). doi:10.18654/1000-0569/2022.07.13
- Hu Mingyue, He Hongliao, Zhan Xiuchun, *et al.* 2008. Matrix normalization for in-situ multi-element quantitative analysis of zircon in laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 36(7): 947~953 (in Chinese with English abstract).
- Huang C M, Zhao Z D, Li G M, *et al.* 2017. Leucogranites in Lhozag, southern Tibet: Implications for the tectonic evolution of the eastern Himalaya [J]. *Lithos*, 294~295: 246~262.
- Jiang Shaoyong, Zhao Kuidong, Jiang Hai, *et al.* 2020. Spatiotemporal distribution, geological characteristics and metallogenic mechanism of tungsten and tin deposits in China: An overview [J]. *Chinese Science Bulletin*, 65: 3 730~3 745 (in Chinese)
- Jin Zhongguo, Zheng Minghong, Liu Ling, *et al.* 2022. Distribution characteristics and enrichment mechanism of lithium in bauxite series in Guizhou Province [J/OL]. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022225>
- Li Guangming, Zhang Linkui, Jiao Yanjie, *et al.* 2017. First discovery and implications of Cuonadong superlarge Be-W-Sn polymetallic deposit in Himalayan metallogenic belt, southern Tibet [J]. *Mineral Deposits*, 36(4): 1 003~1 008 (in Chinese with English abstract).
- Li Guangming, Zhang Linkui, Zhang Zhi, *et al.* 2021. New exploration progresses, resource potentials and prospecting targets of strategic minerals in the southern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41(2): 351~360 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chen, Wang Rucheng, Wu Fuyuan, *et al.* 2021. Lithium mineralization in Qomolangma: First report of elbaite-lepidolite subtype pegmatite in the Himalaya leucogranite belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3 287~3 294 (in Chinese with English abstract).
- Long Zhen, Fu Yong, He Wei, *et al.* 2021. Geochemical characteristics and enrichment mechanism of Li in Xinmin bauxite deposit, Guizhou [J]. *Mineral Deposits*, 40(4): 873~890 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Yang Zongxi, Xie Guiqing, *et al.* 2019b. Critical minerals: International trends and thinking [J]. *Mineral Deposits*, 38(4): 689~698 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Yuan Shunda, Xie Guiqing, *et al.* 2019a. New advances on metallogenic studies and exploration on critical minerals of China in 21st century [J]. *Mineral Deposits*, 38(5): 935~969 (in Chinese with English abstract).
- Monie G and Robert J. 1986. Evolution of the miscibility gap between muscovite and biotite solid solutions with increasing lithium content: An experimental study in the system $K_2O-Li_2O-MgO-FeO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-HF$ at 600°C, 2 kbar P_{H_2O} : Comparison with Natural Lithium Micas [J]. *Mineralogical Magazine*, 50(358): 641~651.
- Qin Kezhang, Zhao Junxing, He Changtong, *et al.* 2021. Discovery of the Qongjiagang giant lithium pegmatite deposit in Himalaya, Tibet, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3 277~3 286 (in Chinese with English abstract).
- Rader S T, Mazdab F K and Barton M D. 2018. Mineralogical thallium geochemistry and isotope variations from igneous, metamorphic, and metasomatic systems [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 243: 42~65.
- Rieder M, Hybler J, Smrčok L, *et al.* 1997. Refinement of the crystal structure of zinnwaldite 2M1 [J]. *European Journal of Mineralogy*, 8(6): 1 241~1 248.
- Sun Yan. 2013. Research on of Typical Rubidium Deposits and Tectonic Background in China [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Tindle A G and Webb P C. 1990. Estimation of lithium contents in trioctahedral micas using microprobe data: Application to micas from granitic rocks [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2(5): 595~610.
- Tischendorf G, Gottesmann B, Förster H, *et al.* 1997. On Li-bearing micas: Estimating Li from electron microprobe analyses and an improved diagram for graphical representation [J/OL]. *Mineralogical Magazine*, 61(409): 809~834. doi:10.1180/minmag.1997.061.409.05
- Tong Jinsong, Zhong Huaming, Xia Jun, *et al.* 2003. Geochemical features and tectonic setting of peraluminous granite in the Lhozag area, southern Tibet [J]. *Geological Bulletin of China*, 22(5): 308~318

- (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong. 2019. Study on critical mineral resources: Significance of research, determination of type, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation [J]. *Acta Geological Sinica*, 93(6): 1 189~1 209 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Dai Hongzhang, Liu Shanbao, *et al.* 2021. New progress and trend in ten aspects of lithium exploration practice and theoretical research in China in the past decade[J/OL]. *Journal of Geomechanics*, 28(5) (in Chinese with English abstract). DOI: 10.12090/j. issn. 1006-6616. 20222811
- Wang R C, Hu H, Zhang A C, *et al.* 2007. Cs-dominant polyolithionite in the Koktokay#3 pegmatite, Altai, NW China: In situ micro-characterization and implication for the storage of radioactive cesium [J/OL]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 153: 355~367. <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0151-y>
- Wang R C, Wu F Y, Xie L, *et al.* 2017. A preliminary study of rare metal mineralization in the Himalayan Leucogranite Belts, South Tibet[J]. *Science China Earth Sciences*, 60(9): 1 655~1 663.
- Wen Hanjie, Zhu Chuanwei, Du Shengjiang, *et al.* 2020. Gallium (Ga), germanium (Ge), thallium (Tl) and cadmium (Cd) resources in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 65: 3 688~3 699 (in Chinese).
- Wu F Y, Liu X C, Liu Z C, *et al.* 2020. Highly fractionated himalayan leucogranites and associated rare-metal mineralization [J]. *Lithos*, 352~353: 105319.
- Wu Fuyuan, Wang Rucheng, Liu Xiaochi, *et al.* 2021. New breakthroughs in the studies of Himalayan rare-metal mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3 261~3 276 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Lingsen and Gao Li'e. 2017. Cenozoic crustal anatexis and the leucogranites in the Himalayan collisional orogenic belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1 420~1 444 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Wu Fuyuan, Hu Ruizhong, *et al.* 2019. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 33(2): 106~111 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua, Chen Huayong and Han Jinsheng. 2020. Data of rubidium-dominant minerals [J]. *Geochinica*, 49(6): 690~693 (in Chinese with English abstract).
- 胡方决, 吴福元, 陈国辉, 等. 2022. 花岗-伟晶岩型锂矿床围岩变质沉积岩中锂富集的关键因素: 以松潘-甘孜构造带东部可尔因地区为例 [J]. *岩石学报*, 38(7): 2 017~2 051.
- 胡明月, 何红蓼, 詹秀春, 等. 2008. 基体归一定量技术在激光烧蚀-离子体质谱法锆石原位多元素分析中的应用 [J]. *分析化学*, 36(7): 947~953.
- 蒋少涌, 赵葵东, 姜海, 等. 2020. 中国钨锡矿床时空分布规律、地质特征与成矿机制研究进展 [J]. *科学通报*, 65: 3 730~3 745.
- 金中国, 郑明泓, 刘玲, 等. 2022. 贵州铝土矿含矿岩系中锂的分布特征及富集机理 [J/OL]. *地质学报*, <https://doi.org/10.19762/j. enki. dizhixuebao. 2022225>
- 李光明, 张林奎, 焦彦杰, 等. 2017. 西藏喜马拉雅成矿带错那洞超大型铍锡钨多金属矿床的发现及意义 [J]. *矿床地质*, 36(4): 1 003~1 008.
- 李光明, 张林奎, 张志, 等. 2021. 青藏高原南部的主要战略性矿产: 勘查进展、资源潜力与找矿方向 [J]. *沉积与特提斯地质*, 41(2): 351~360.
- 刘晨, 王汝成, 吴福元, 等. 2021. 珠峰地区锂成矿作用: 喜马拉雅淡色花岗岩岩首个锂电气石-锂云母型伟晶岩 [J]. *岩石学报*, 37(11): 3 287~3 294.
- 龙珍, 付勇, 何伟, 等. 2021. 贵州新民铝土矿矿床 Li 的地球化学特征与富集机制探究 [J]. *矿床地质*, 40(4): 873~890.
- 毛景文, 杨宗喜, 谢桂青, 等. 2019b. 关键矿产——国际动向与思考 [J]. *矿床地质*, 38(4): 689~698.
- 毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 等. 2019a. 21 世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展 [J]. *矿床地质*, 38(5): 935~969.
- 秦克章, 赵俊兴, 何畅通, 等. 2021. 喜马拉雅琼嘉岗超大型伟晶岩型锂矿的发现及意义 [J]. *岩石学报*, 37(11): 3 277~3 286.
- 孙艳. 2013. 我国铷典型矿床及其成矿构造背景研究 [D]. 北京: 中国地质大学.
- 童劲松, 钟华明, 夏军, 等. 2003. 藏南洛扎地区过铝质花岗岩的地球化学特征及构造背景 [J]. *地质通报*, 22(5): 308~318.
- 王登红. 2019. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向 [J]. *地质学报*, 93(6): 1 189~1 209.
- 王登红, 代鸿章, 刘善宝, 等. 2022. 中国锂矿十年来勘查实践和理论研究的十个方面新进展新趋势 [J/OL]. *地质力学学报*, 28(5). DOI: 10.12090/j. issn. 1006-6616. 20222811
- 温汉捷, 朱传威, 杜胜江, 等. 2020. 中国镓锗铟资源 [J]. *科学通报*, 65: 3 688~3 699.
- 吴福元, 王汝成, 刘小驰, 等. 2021. 喜马拉雅稀有金属成矿作用研究的新突破 [J]. *岩石学报*, 37(11): 3 261~3 276.
- 曾令森, 高利娥. 2017. 喜马拉雅碰撞造山带新生代地壳深熔作用与淡色花岗岩 [J]. *岩石学报*, 33(5): 1 420~1 444.
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等. 2019. 战略性关键金属矿产资源: 地质出版社现状与问题 [J]. *中国科学基金*, 33(2): 106~111.
- 赵振华, 陈华勇, 韩金生. 2020. 关于铷的独立矿物 [J]. *地球化学*, 49(6): 690~693.

附中文参考文献

- 高利娥, 曾令森, 高家昊, 等. 2021. 喜马拉雅淡色花岗岩关键金属 Sn-Cs-Tl 的富集机制 [J]. *岩石学报*, 37(10): 2 923~2 943.
- 侯增谦, 陈骏, 翟明国. 2020. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿 [J]. *科学通报*, 65(33): 3 651~3 652.