DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2024.05.010
引文格式: 许箭琪, 郭春丽, 闫金禹, 张斌武, 赵迁迁, 周睿. 2025. 赣南中生代海罗岭稀有金属矿床成因——基于云母微量元素的研究[J]. 华东地质, 46(1): 33-54. (XU J Q, GUO C L, YAN J Y, ZHANG B W, ZHAO Q Q, ZHOU R. 2025. Genesis of the Mesozoic Hailuoling granite-pegmatite rare-metal deposit in southern Jiangxi Province—based on the trace-element study in mica[J]. East China Geology, 46(1): 33-54.)

赣南中生代海罗岭稀有金属矿床成因——基于云母微量元素的研究

许箭琪[1,2], 郭春丽[1,3], 闫金禹[1], 张斌武[1], 赵迁迁[1], 周 睿[4]

(1. 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 自然资源部深地科学与探测技术实验室, 中国地质科学院, 北京 100094; 4. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 位于赣南石城县的海罗岭矿床是一个形成于中生代的花岗伟晶岩型 Nb-Ta 多金属矿床, 以往研究大多关注该矿床的地质特征而未阐明其成因机制。文章通过电子探针(EPMA)和激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)测试技术, 对矿床中细粒钠长石化花岗岩、云英岩化花岗岩、云英岩和伟晶岩中的各类型云母进行分析, 发现细粒钠长石化花岗岩中的云母主要是锂云母和铁锂云母, 云英岩化花岗岩和云英岩中的云母主要是黑鳞云母, 伟晶岩中的云母主要是铁锂云母和黑鳞云母, 它们并未按照花岗岩→云英岩化花岗岩→云英岩→伟晶岩序列中云母的锂含量逐步升高的顺序演化。而且, 与云英岩化花岗岩和云英岩相比, 细粒钠长石化花岗岩中云母的 Rb、Li、F 含量更高, 但 K/Rb 值却更低, 可能为同源岩浆经历了更高分异程度的产物。伟晶岩中出现的似筛状结构表明其经历了早期慢速成核和晚期快速冷却的转变过程。通过与新疆可可托海稀有金属矿床的地质特征和伟晶岩矿物学特征进行对比, 推测两者具有相似的成因, 均经历了以熔体为主的结晶分异、流体出溶和熔体-流体共存阶段。在熔体-流体共存体系脱离岩浆房上侵的过程中, 某些矿物经历缓慢结晶而发生快速冷却、固结, 形成了这种远离岩浆房且各种岩性混杂堆积的花岗伟晶岩型矿床。

关键词: 稀有金属矿床; 花岗伟晶岩型; 云母微量元素; 海罗岭; 可可托海; 赣南

中图分类号: P611;P618.79;P618.86 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1871(2025)01-033-22

花岗伟晶岩是锂、铍、铌、钽、铷、铯、锆和铪等稀有金属元素的重要赋矿岩体, 其分异演化与成矿作用密切相关, 受到了国内外学者的广泛关注(Benson et al., 2023; Grew 和 Hazen, 2014; Linnen et al., 2012; 孙建东等, 2023; 徐喆等, 2024)。前人针对稀有金属伟晶岩的成矿构造背景(Grew et al., 2018; Grew, 2020; 熊定一等, 2023)、花岗岩-伟晶岩的成因(Müller et al., 2017; Simmons et al., 2016)以及伟晶岩熔体的形成与演化(Thomas et al., 2011, Thomas 和 Davidson, 2012)等方面开展了大量研究, 建立了多种成矿模式(李建康等, 2023)。一般认为, 伟晶岩是花岗岩经历高分异作用的产物, 与母体花岗岩存在紧密的时空耦合关系(Černý et al., 1985, 2012; Villaros 和 Pichavant, 2019)。但在一些伟晶岩的周围尚未发现花岗岩, 或与周围花岗岩不存在明显的成因联系, 因此, 一些学者提出了伟晶岩深熔成因理论(Lv et al., 2021; Müller et al., 2017)。陈衍景和韩金生(2024)将伟

* **收稿日期:** 2024-05-28 **修订日期:** 2024-10-18 **责任编辑:** 石磊

基金项目: 国家自然科学基金“南岭‘东钨西锡’空间规律的关键制约因素: 基于精细矿物学对岩浆过程差异性的研究(编号: 92162210)”和“南岭锡田印支期与燕山期花岗岩钨锡成矿能力的差异性(编号: 42172096)”项目联合资助。

第一作者简介: 许箭琪, 1995 年生, 男, 博士研究生, 主要从事花岗岩及成矿研究工作。Email: jianqi_xu@126.com。

通信作者简介: 郭春丽, 1978 年生, 女, 研究员, 博士, 主要从事花岗岩及成矿研究工作。Email: gchunli@126.com。

晶岩与花岗岩的关系总结为以下 3 种：①花岗岩浆高度分异产生的残余熔体-流体结晶形成的“母子关系”；②花岗岩与伟晶岩均来源于深部母岩浆的“兄弟关系”；③伟晶岩形成于围岩低程度变质脱水后部分熔融，与花岗岩“没有关系”。

目前，在我国新疆、江西、四川、内蒙古、湖南、福建、广西和广东等地区均产出大量的花岗-伟晶岩型矿床。赣南石城地区是花岗岩型和伟晶岩型稀有金属矿床的矿集区，以海罗岭伟晶岩型矿床和姜坑里花岗岩型矿床为主要代表，其中海罗岭矿床产出有铌、钽等稀有金属，含有锂辉石（徐喆等，2023），铌、钽的预测资源量共计 3 569.9 t，其中铌的预测资源量为 1 858.32 t，钽的预测资源量为 1 711.58 t[1]，锆（铪）、锂、铷也有一定规模（胡论元等，2015）。海罗岭地区长英质岩石岩性组合非常复杂，主要为花岗岩、伟晶岩和云英岩，矿物发生强烈蚀变，伟晶岩并不具有带状或层状构造（刘东杰等，2018）。目前，该矿床的研究程度相对较低，各类型岩石（包括花岗岩、云英岩和伟晶岩）的直接成因联系尚不清楚，需要进一步研究。另一方面，云母是花岗岩、云英岩和伟晶岩中的重要造岩矿物，贯穿了岩浆阶段到热液阶段的全过程，对岩浆分异演化程度和稀有金属成矿作用具有良好的指示作用（Vieira et al., 2011；韩志辉等，2024；王汝成等，2019）。为此，本文对该矿床主要岩性中含有的各类云母开展了电子探针（EPMA）和激光剥蚀电感耦合等离子体质谱（LA-ICP-MS）测试分析，并详细划分了云母类型，区分了云母成分。同时，结合该矿床的地质特征和伟晶岩的显微结构特征，将其与国内同类型的花岗-伟晶岩型矿床进行对比，从而揭示海罗岭矿床的形成过程及成因机制。

1 研究区概况

1.1 区域地质特征

海罗岭 Nb-Ta 矿床位于江西省南部石城县以东约 20 km 处。区域上出露有南华纪万源岩组（Nh_1w）变粒岩、南华纪—震旦纪洪山组（Nh_2Z_1h）变余砾岩和石墨石英片岩、寒武纪外管坑组（$Є_1w$）硅质岩和碳质板岩和白垩纪茅店组（K_2m）红色砂（砾）岩。区内断层发育，以 NE 向、NNE 向和 NW 向断层为主，断裂控制着区内的岩浆岩侵位、白垩纪盆地展布和稀有金属矿床（点）的分布。

区域内岩浆活动剧烈，广泛分布加里东期和燕山期花岗岩（图 1）。加里东期花岗岩形成于志留纪，呈岩基状产出，主要有会同岩体和宁化岩体，岩性以中粒斑状黑云母二长花岗岩为主，年龄为 425.8±6.2 Ma（崔圆圆等，2013）。燕山期花岗岩分为侏罗纪和白垩纪两期，侏罗纪花岗岩呈岩株状产出，围绕在海罗岭、姜坑里矿区周围，岩性主要为二长花岗岩和花岗闪长岩；白垩纪花岗岩分布在海罗岭矿区内，岩性为中粒斑状黑云母二长

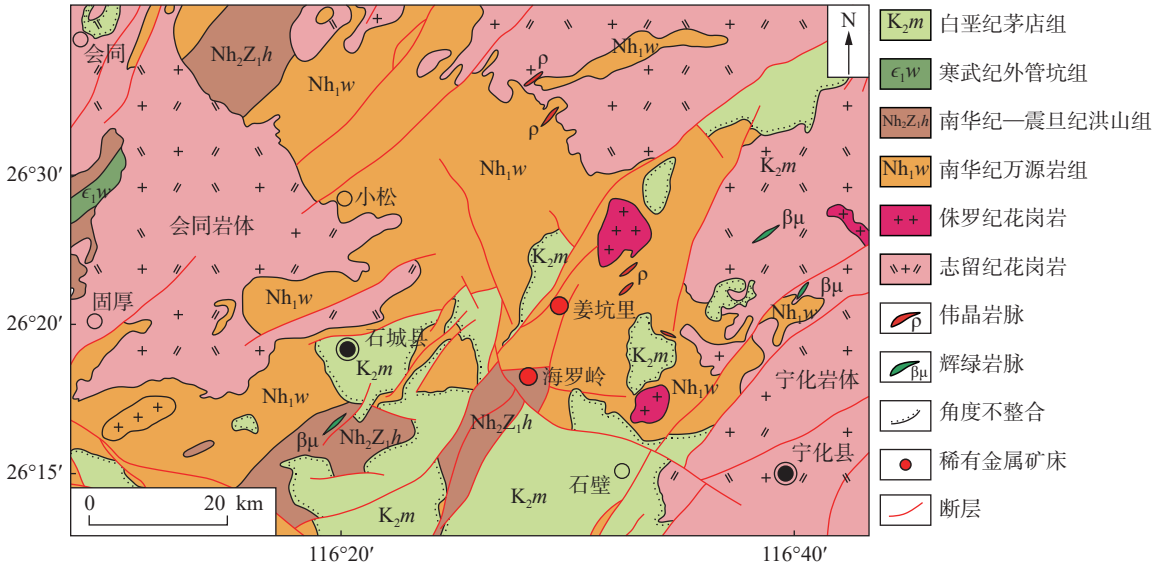


图1 江西石城地区地质简图（据徐喆等，2023 修改）

Fig. 1 Simplified geology of Shicheng in Jiangxi, China (Modified from Xu et al., 2023)

花岗岩、中细粒黑云母二长花岗岩(年龄分别为127.7 Ma 和 141.6 Ma)以及钠长石化花岗岩(徐喆等, 2023)。区域内还出露有花岗斑岩脉、伟晶岩脉和辉绿岩脉等侵入体。伟晶岩脉与稀有金属矿化密切相关, 常成群出露。

1.2　矿床地质特征

矿区内出露有细粒钠长石化花岗岩、云英岩化花岗岩、云英岩及伟晶岩, 它们在空间上紧密共生(图 2(a))。各类岩石的分带并不明显, 不具有带状或层状构造, 在空间上杂乱堆积。伟晶岩主要分布在细粒钠长石化花岗岩边部, 在花岗岩顶部与变质岩的接触带上还分布有隐爆角砾岩。钠长石化花岗岩在空间上穿切了早期二长花岗岩、云英岩化花岗岩和云英岩(图 2(b)), 说明钠长石化花岗岩、云英岩化花岗岩、云英岩和伟晶岩并不是传统岩浆结晶分异的产物。

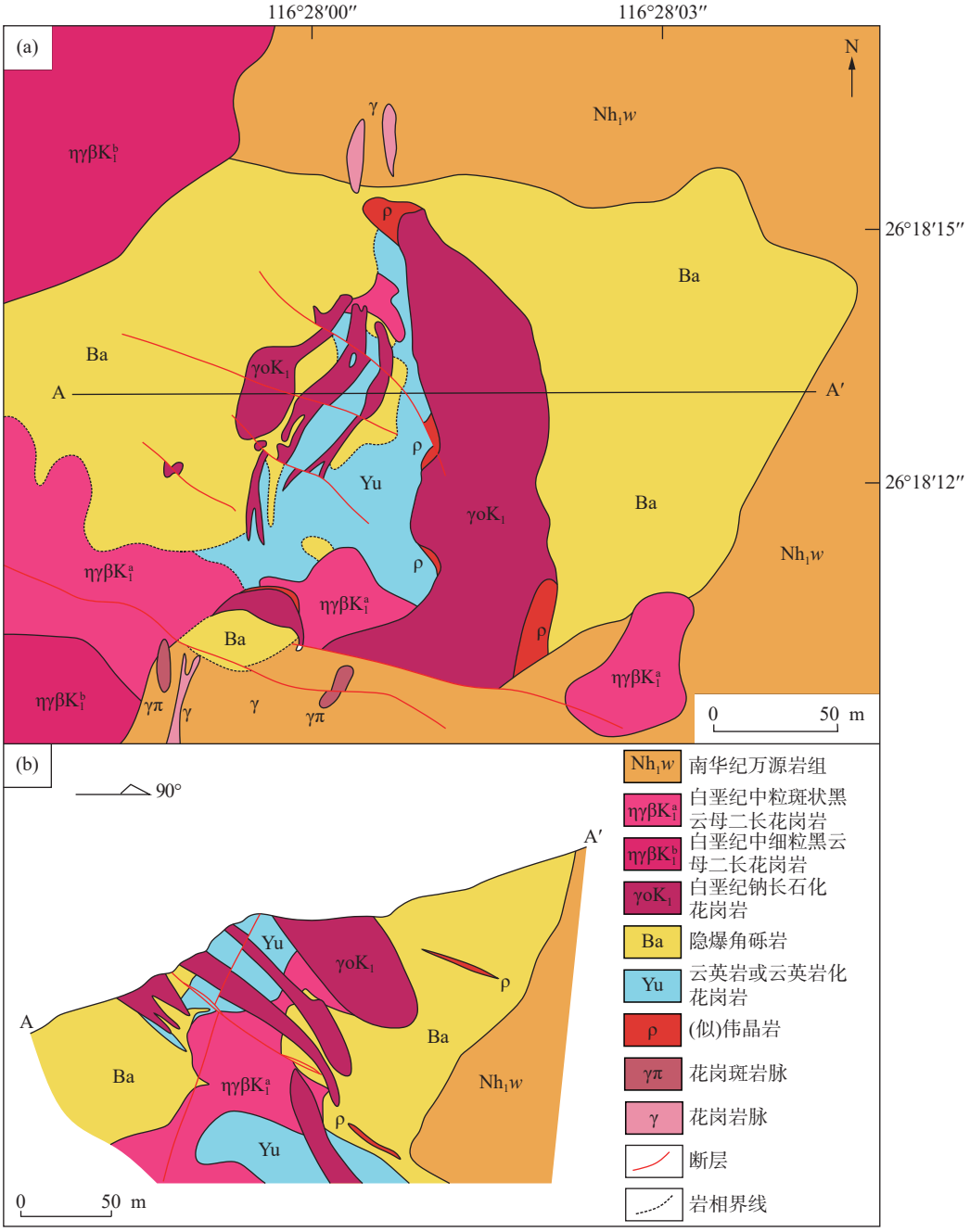
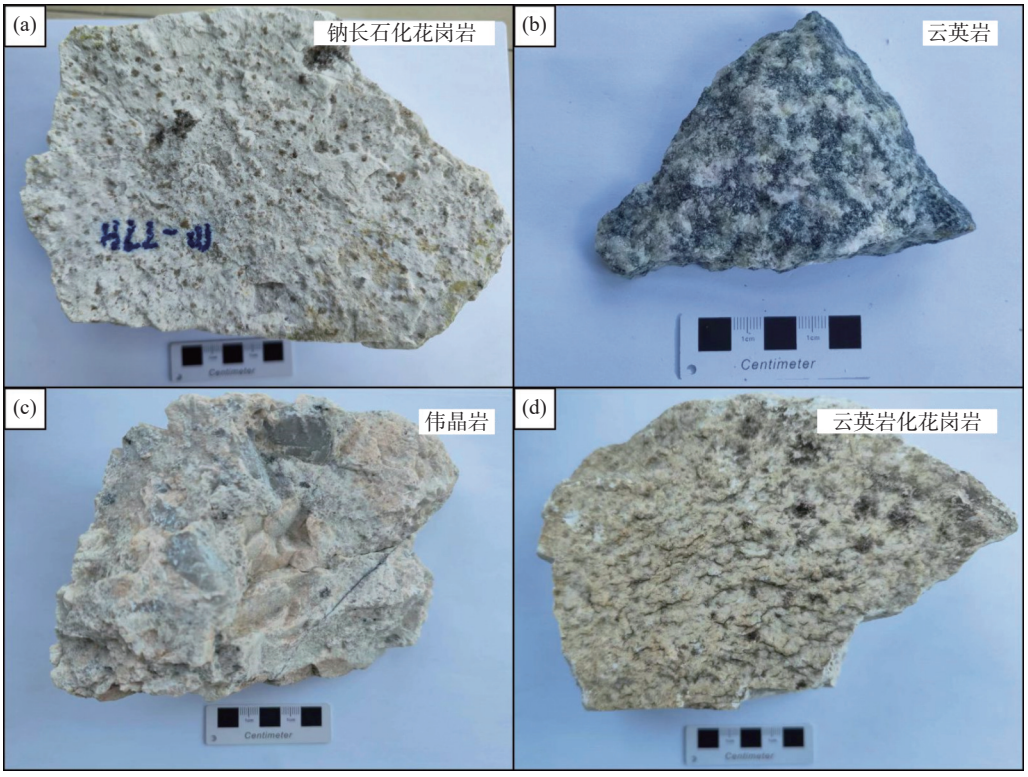


图2　海罗岭矿区地质简图(a)与剖面图(b)(据徐喆等，2023 修改)

Fig. 2　Simplified geology (a) and section (b) of Hailuoling deposit (Modified from Xu et al.，2023)

含矿岩体主要为钠长石化花岗岩和伟晶岩，多呈脉状，部分呈透镜状，在剖面上呈侧列分布（图 2(b)）。细粒钠长石化花岗岩矿体主要呈似斑状结构（图 3(a)），基质具有细粒花岗结构，块状构造；伟晶岩型矿体主要为细粒-中粒伟晶结构（图 3(c)），呈条带状或块状构造。矿石矿物主要为铌钽矿物（如铌钽铁矿、锰钽铁矿、铌铁矿等）、锂矿物（如锂辉石、铁锂云母、锂云母等）、细晶石和锆石等，脉石矿物主要为石英、钠长石、钾长石，以及少量的黑鳞云母、绢云母、石榴子石、电气石、绿泥石和高岭石等。成矿元素主要为铌（Nb_2O_5 含量为 0.011 9%）、钽（Ta_2O_5 含量为 0.017 0%）、锂（Li_2O 含量为 0.115 6%）、铷（Rb_2O 含量为 0.152 1%）等（徐喆等，2023）。

矿区内花岗岩蚀变主要为钠长石化、云英岩化、黄玉化，还伴随有绢云母化、硅化、高岭土化和绿泥石化等，蚀变程度自上而下、自中心向外围逐渐减弱。钠长石化和云英岩化与矿化关系密切（刘东杰等，2018）。钠长石化发育在岩体内部，钠长石呈叶片状、板条状在造岩矿物粒间交代或在矿物内呈穿孔状，部分呈他形粒状或团块状产出。云英岩化发育在花岗岩体边部，白云母呈不规则状，石英呈他形粒状，交代钠长石或被钠长石交代（图 3(b)和图 3(d)）。



（a）.细粒钠长石化花岗岩手标本；（b）.云英岩手标本；（c）.伟晶岩手标本；（d）.云英岩化花岗岩手标本

图3 赣南海罗岭矿床岩石手标本照片

Fig. 3 Photos of rock specimens from Hailuoling deposit

2 测试方法

样品采自海罗岭矿床，分别采集了细粒钠长石化花岗岩、云英岩化花岗岩、云英岩和伟晶岩样品，并磨制探针片。矿物微区主量元素电子探针分析（EPMA）和微量元素激光剥蚀电感耦合等离子体质谱分析（LA-ICP-MS）均在中国地质科学院矿产资源研究所完成。在 EPMA 下对云母矿物进行测试，并对同一云母颗粒进行 LA-ICP-MS 分析。EPMA 测试仪器为 JEOL JXA-8 230 场发射电子探针，加速电压为 15 kV，束流为 20 nA，束斑直径为 4 μm，所有元素信号采集时间为 15 s，背景时间为 5 s，原始数据采用 ZAF 方法校正，主量元素分析精度优于 5%。LA-ICP-MS 测试激光剥蚀系统为 RESOlution S-155 型 193 nm 准分子激光，电感耦合等离子体质谱仪型号为 Thermo Fisher ElementXR，

激光剥蚀过程中, 每个单点的分析数据包括大约 2 s 的预剥蚀、20 s 的空白信号和 40 s 的样品信号。外标样采用 SRM610 玻璃, 监控样采用 SRM612, 数据处理时以云母中 Al 元素的电子探针分析结果为内标。

3　结果

3.1　岩相学特征

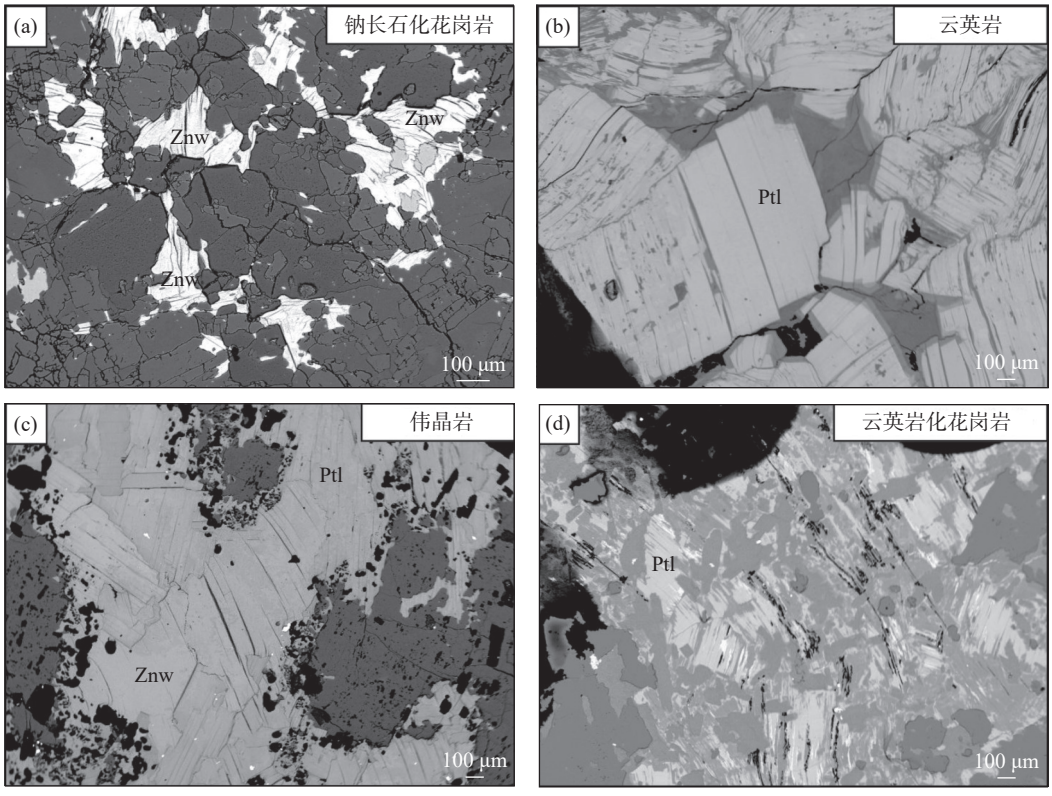
钠长石化花岗岩中的云母主要为铁锂云母, 多呈半自形-他形粒状或粒状产出, 颗粒大小为 30～200 μm。BSE 图像显示其未表现出成分分带特征, 可见交代残余结构(图 4(a))。云母与石英、长石等矿物共生, 与其他矿物之间的界线清晰, 部分云母嵌入石英中。

云英岩和云英岩化花岗岩中的云母主要为黑鳞云母, 呈自形-半自形片状产出, 颗粒较大, 宽度为 200～400 μm。云英岩中云母常见成分不均一、交代和不平衡等现象, 在云母周边形成约 10 μm 的窄边, 与核部共同呈现出明暗变化, 云母核部较亮, 边部较暗(图 4(b))。部分云母矿物中间可见石英颗粒嵌入。云英岩化花岗岩中上述现象更加普遍, 云母矿物边界受交代作用影响呈不规则状, 不平衡结构更加多见(图 4(d))。

伟晶岩中的云母主要为铁锂云母和黑鳞云母, 呈自形-半自形片状产出, 颗粒大小为 100～300 μm。云母成分分带并不明显, 2 种类型云母之间的明暗差异较弱。云母与石英等其他矿物间的边界呈不规则状。矿物中可见大量孔洞, 呈自形长柱状、片状或他形粒状, 整体呈似筛状结构(图 4(c))。这些现象表明体系处于不稳定、不平衡状态, 体系组分因此发生了变化。

3.2　云母主量元素特征

海罗岭矿床各类岩石中云母主量元素测试结果见表 1, 完整数据见附表 1。云母主量元素主要包括SiO_2、Al_2O_3 和FeO。(Mg-Li)-(Fe_{tot}+Mn+Ti-Al^{VI})分类图解(图 5)显示, 细粒钠长石化花岗岩中的云母主要为铁锂云母和锂云母, 云英岩和云英岩化花岗岩中的云母主要为黑鳞云母, 伟晶岩中的云母主要为铁锂云母。



(a).钠长石化花岗岩; (b).云英岩; (c).伟晶岩; (d).云英岩化花岗岩; Znw.铁锂云母; Ptl.黑鳞云母

图4　赣南海罗岭矿床云母 BSE 图像

Fig. 4　BSE images of micas from Hailuoling deposit

在4类岩(矿)石中,云英岩与云英岩化花岗岩中云母的主量元素组成极为接近。钠长石化花岗岩中的云母 SiO_2 含量最高(48.53%),伟晶岩中的云母其次(44.03%),云英岩和云英岩化花岗岩中的云母 SiO_2 含量最低(分别为 40.88% 和 40.37%)。云母中 FeO 的含量按钠长石化花岗岩→伟晶岩→云英岩/云英岩化花岗岩的顺序呈逐渐增高的趋势,Li、F 的含量则逐渐降低(图 6)。

表1 赣南海罗岭矿床云母电子探针分析结果/%

Table 1 Electron microprobe analysis results /% of micas from Hailuoling deposit

样品岩性	钠长石化花岗岩	云英岩	伟晶岩	云英岩化花岗岩
测试数量	n=9	n=40	n=35	n=13
SiO_2	48.53	40.88	44.03	40.37
TiO_2	0.11	0.12	0.06	0.11
Al_2O_3	21.10	20.23	21.65	20.49
FeO	10.51	18.18	15.12	18.22
MnO	1.23	1.01	0.84	0.96
MgO	0.02	0.11	0.02	0.01
Na_2O	0.16	0.07	0.17	0.09
K_2O	10.10	9.96	9.96	9.78
F	5.71	4.04	4.97	3.62
Cl	0.00	0.01	0.01	0.02
Li_2O*	2.76	1.55	2.48	1.57
H_2O*	1.56	1.99	1.76	2.17
O=F, Cl	2.40	1.70	2.10	1.53
Total	99.37	96.45	98.98	95.88

注:*为计算值

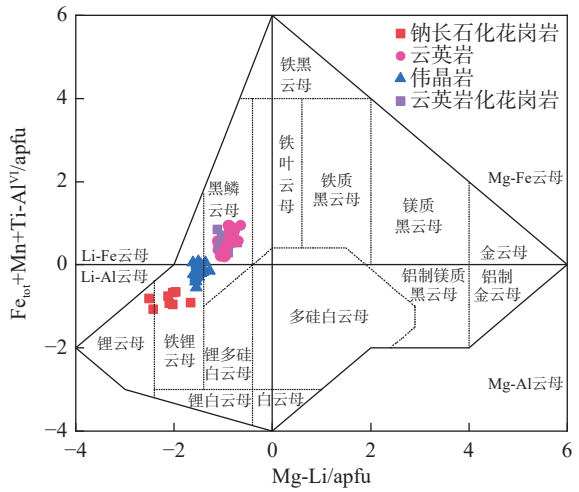


图5 赣南海罗岭矿床云母 Mg-Li 与 Fe_{tot}+Mn+Ti-Al^{VI} 判别图解(底图据 Tischendorf et al., 1997)

Fig. 5 Plot of Mg-Li vs. Fe_{tot}+Mn+Ti-Al^{VI} for micas from Hailuoling deposit (Modified from Tischendorf et al., 1997)

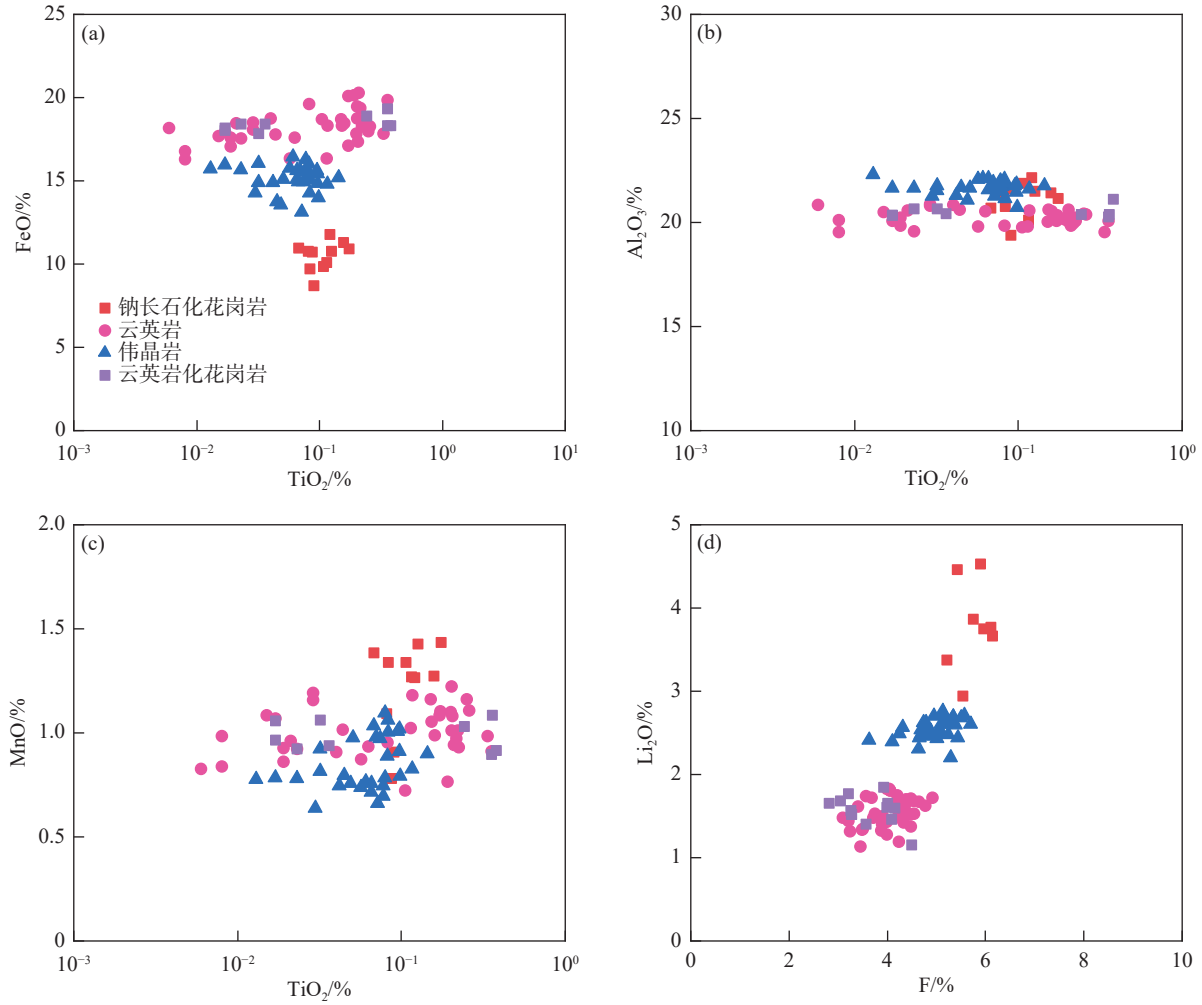
3.3 云母微量元素特征

云母微量元素分析结果见表 2,完整数据见附表 2。测试的微量元素主要有 Li、Be、Nb、Ta、Rb、Cs、Zn、Sn、W、Sc、Tl 等,Cu、Mo、Sb、Ag、Sr、REE、Y 等元素的含量均低于检测限。按钠长石化花岗岩→伟晶岩→云英岩/云英岩化花岗岩的顺序,云母中 Li、Be、Rb 等不相容元素呈现出逐渐降低的趋势,Nb、Ta 元素相对振荡。其中,伟晶岩中云母的 Nb 含量最高,云英岩和云英岩化花岗岩云母次之,钠长石化花岗岩中云母的 Nb 含量最低,Ta 元素含量变化趋势与之相反(图 7)。

4 讨论

4.1 云母对岩浆分异程度和演化顺序的指示意义

云母的类型能够反映出与之达到平衡的花岗岩浆的结晶分异程度,云母中的稀有元素和挥发分元素 Li、Be、Rb、Cs、Nb、Ta、F 的含量随岩浆逐步分异而逐渐增加,相应地 K/Rb 值、Nb/Ta 值则逐渐降低(Breiter et al., 2017a; Li et al., 2015; Yin et al., 2019)。上述元素以类质同象方式赋存在不同结构和成分的云母族矿物中(Ellis et al., 2022; Munk et al., 2018; Roda-Robles et al., 2006; Troch et al., 2022)。因此,随着花岗岩分异程度逐步增加,云母的类型也逐渐发生转变,出现了富稀有金属元素的多硅白云母、锂白云母、铁锂云母、锂云母等(Breiter et al., 2017b; Roda et al., 2007; Van Lichtervelde et al., 2008; 李洁等, 2013)。例如,湖南香花铺矿区的尖峰岭岩体,岩石从下至上的演化顺序为碱长花岗岩带→钠长花岗岩带→云英岩带→伟晶岩带,对应的云母类型为黑云母→黑鳞云母→铁锂云母→铝质铁锂云母→锂白云母(邱瑞照等, 1998; 覃莉茜等, 2021; 袁玲玲等, 2022);内蒙古赵井沟花岗岩体由下至上的岩性演化顺序为钠长石花岗岩→云英岩化钠长花岗岩→云英岩,对应的云母类型为含锂铷白云母→铁锂云母→锂云母(Zhang 和 Jiang, 2021; 聂凤军等, 2013; 吴欢欢, 2020);河北麻地花岗岩体的演化顺序为肉红色碱长花岗岩→灰白色碱长花岗岩→白色含天河



（a）.FeO-TiO_2 图解；（b）.Al_2O_3-TiO_2 图解；（c）.MnO-TiO_2 图解；（d）.Li_2O-F 图解

图6　海罗岭矿床不同类型岩石云母主量成分变化图解

Fig. 6　Diagram of major elements in micas from different rocks of Hailuoling deposit

石碱长花岗岩, 其对应的云母类型为锂铁云母(锂白云母)→铁锂云母→锂云母(苗群峰, 2018; 苗群峰和齐云飞, 2020)。因此, 通过对比云母类型以及云母中 Li、Rb、Cs、F 等元素的含量和 K/Rb 值、K/Cs 值, 并结合野外实际证据, 可以查明岩体的成因和演化趋势。

海罗岭稀有金属矿床钠长石化花岗岩→云英岩化花岗岩→云英岩→伟晶岩演化序列中云母的 Li、Rb、Cs、F 等元素含量没有呈现出随岩性变化而逐步升高的演化趋势(图 7), 其中, 钠长石化花岗岩云母中 Li、Rb、Cs、F 的含量明显高于云英岩云母中相应元素的含量, 云英岩云母的 K/Rb 值也略高于钠长石化花岗岩(图 8)。而且相应云母的类型为铁锂云母→黑鳞云母→黑鳞云母→黑鳞云母+铁锂云母(图 4), 也没有呈现如上述典型矿床一样的变化规律。海罗岭矿床各岩性中云母的微量元素及其相应的云母类型特征并不符合典型岩浆演化过程的变化规律, 表明海罗岭矿床中钠长石化花岗岩、云英岩化花岗岩、云英岩和伟晶岩的形成并非受控于岩浆的逐渐结晶分异过程。海罗岭矿床 3 类岩性的分异程度从高到低依次为: 钠长石化花岗岩、伟晶岩、云英岩(图 4)。钠长石化花岗岩在空间上穿切了云英岩和云英岩化花岗岩(图 2), 说明矿区局部范围内的钠长石化花岗岩的形成可能稍晚于云英岩化花岗岩和云英岩。上述微量元素特征和野外穿切关系共同指示了该矿床中的不同岩性的岩石并不是按照钠长石化花岗岩→云英岩→伟晶岩的顺序逐渐演化形成的。

表2 赣南海罗岭矿床云母 LA-ICP-MS 分析结果

Table 2 LA-ICP-MS data for micas from Hailuoling deposit

样品岩性	钠长石化花岗岩	云英岩	伟晶岩	云英岩化花岗岩
Li	13 741~21 134	5 305~8 536	10 270~12 869	5 379~8 596
Be	24.1~43.0	12.4~44.8	3.5~51.7	14.7~31.8
Sc	27.6~35.2	6.7~22.1	31.7~59.4	7.8~23.8
Mn	5 233~8 233	2 941~7 332	4 866~7 612	5 117~7 495
Zn	1 076~1 661	825~2 330	901~2 189	926~2 073
Ga	63.6~103.1	102.6~187.6	30.6~166.9	115.1~164.3
Rb	8 972~15 078	6 416~9 518	2 131~11 041	6 374~7 839
Nb	30.5~50.3	13.9~168.1	38.9~410.6	23.9~105.9
Cd	2.3~3.6	1.7~9.6	2.2~14.3	3.0~9.2
In	0.9~1.0	1.3~5.7	0.7~2.0	1.9~3.6
Sn	49.6~69.9	51.5~256.6	56.8~417.0	80.5~237.4
Cs	42.5~141.7	165.1~468.1	7.4~958.9	129.4~309.6
Ba	5.1~13.3	57.2~607.1	15.0~86.0	95.0~300.8
Ta	39.5~124.0	19.1~207.5	15.7~78.0	37.5~222.4
W	25.0~45.2	3.4~15.3	12.4~63.5	6.6~21.6
Tl	16.0~27.1	14.7~102.9	10.1~78.7	21.2~33.0
Pb	1.3~4.3	2.7~14.0	1.1~54.4	1.9~6.1
Ta/Nb	1.0~2.9	0.5~2.4	0.2~0.4	1.5~2.2
Nb/Ta	0.3~0.9	0.4~2.0	2.5~6.8	0.5~0.7
Sn/W	1.2~2.2	7.4~52.5	1.8~17.9	9.5~18.7
K/Rb	5.0~7.8	6.8~11.4	6.4~12.6	8.2~11.8

注：各元素的含量单位均为10^{-6}

4.2 海罗岭与可可托海矿床成因的相似性

从钠长石化花岗岩到云英岩，成矿系统逐步从受岩浆结晶分异控制的岩浆体系过渡到岩浆–热液共存体系（Thomas et al., 2000, 2009; 郭春丽等, 2024）。海罗岭矿床也经历了从以熔体为主的阶段进入到以流体出溶为主的熔体–流体共存的相对不稳定阶段，钠长石化花岗岩、云英岩和伟晶岩可能均来自深部隐伏岩浆，而不是岩浆逐渐结晶的产物。类似现象在新疆可可托海（周起凤等, 2013）、川西甲基卡（韩志辉等, 2024）等地均有出现。

新疆阿尔泰可可托海花岗伟晶岩型稀有金属矿集区以规模巨大、具有完美的伟晶岩结构分带而闻名世界（秦克章等, 2021）。根据可可托海 3 号伟晶岩脉与近矿白云母钠长石化花岗岩的年龄和元素差异性，前人研究认为近矿花岗岩与伟晶岩之间并非是通常所认为的分异成因关系，地表出露的花岗伟晶岩矿床和近矿白云母钠长石化花岗岩都是其下部隐伏岩浆经历高度结晶分异，且发生了熔体–流体共存阶段的产物（Han et al., 2022; Zhou et al., 2015; 陈衍景等, 2024）。

赣南海罗岭矿床与新疆可可托海矿床在成因类型上具有诸多相似之处，两者的含矿岩体均隐伏于矿体下部，并且岩体中不存在钠长石化花岗岩→云英岩→伟晶岩的演化关系。前文已经对海罗岭矿床进行了详细论述，与此相似，有研究表明，在可可托海矿床 3 号脉伟晶岩中，外部带和内部带中的云母在成分和结构上具有明显差异，内部带演化程度和流体组分比例明显高于外部带，不符合从内向外分异程度逐渐增加的演化趋势。而且，单从内部带来看也呈现出无规律性的变化特征，长石、云母等矿物的 Li、Be、Rb、Cs 等元素含量呈现出先升高后降低的振荡变化，在更小尺度上外部带中云母的 Li、F 元素含量也呈振荡变化的特征（周起凤等, 2013）。

2 个矿床中云母的显微结构也具有相似的特征，均具有似筛状结构。这种构造通常是在侵位过程中快速冷却的条件下，温度、压力或成分的突然变化所导致的（London, 2005, 2009; Sirbescu et al., 2009; Webber et al., 1997）。可可托海伟晶岩中云母的似筛状结构（Zhou et al., 2015）与海罗岭矿

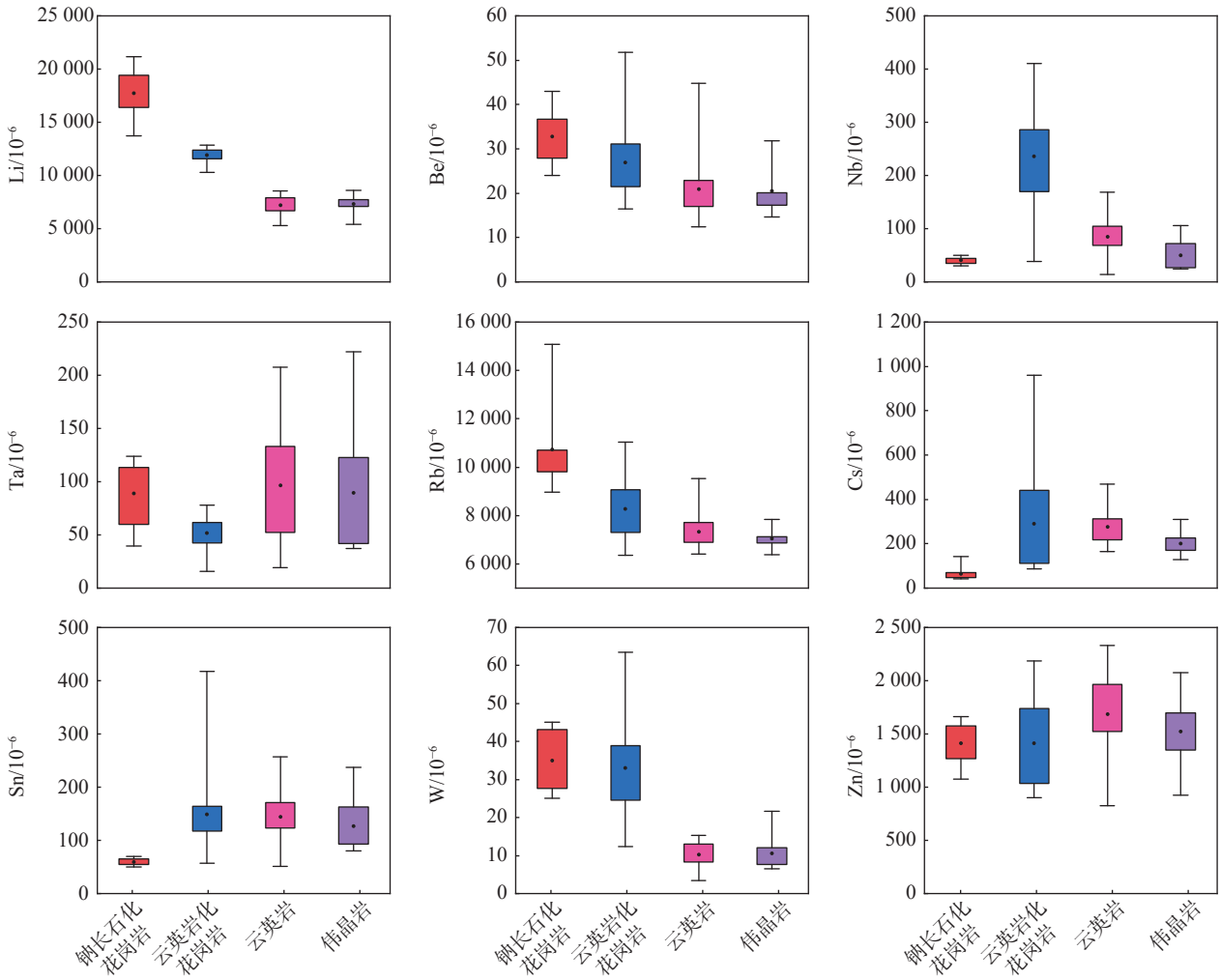


图7　赣南海罗岭矿床云母代表性微量元素箱线图

Fig. 7　Box charts of representative trace elements in micas from Hailuoling deposit

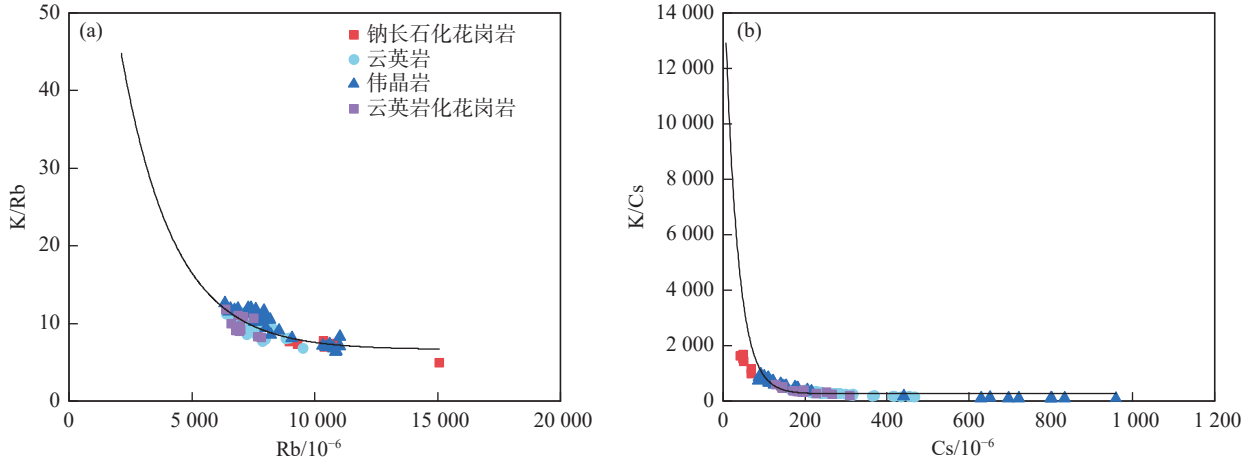


图8　赣南海罗岭矿床云母 K/Rb-Rb(a)和 K/Cs-Cs(b)图解

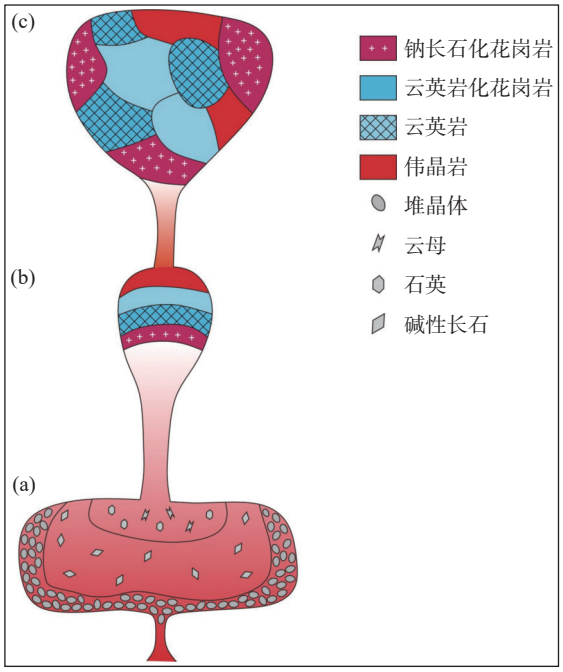
Fig. 8　Plots of K/Rb-Rb (a) and K/Cs-Cs (b) in micas from Hailuoling deposit

床伟晶岩中云母的似筛状结构(图 4(c))共同说明两者均形成于早期缓慢结晶、后期快速冷却的条件下。与可可托海超大型矿床相比, 海罗岭矿床虽然在矿床规模、矿石品位和资源量上与之相距

甚远，但其地质特征、岩性组合、分异程度和云母结构等特征与可可托海矿床高度相似。

4.3 海罗岭稀有金属矿床的成矿模型

与花岗岩有关的稀有金属矿床多阶段不同岩性的形成是岩浆房原地结晶分异的结果，正是由于经历了岩浆的高度结晶分异过程，才使得残留熔体发生多次抽离，从而导致稀有金属在高分异岩浆中越来越富集(郭春丽等，2024)。鉴于海罗岭矿床中的钠长石化花岗岩、云英岩和伟晶岩在空间上没有明显的分带(图 2(b))，以及其与可可托海矿床具有相似成因，并且其含矿母岩为隐伏岩体，本文构建了花岗岩型稀有金属矿床的形成模式(图 9)。



(a).底部富堆晶体、中部富碱性长石、顶部富云母石英的岩浆房；(b).残余熔体形成的含矿岩浆；(c).海罗岭稀有金属矿床

图9 赣南海罗岭稀有金属矿床成矿模式图

Fig. 9 Metallogenic model of Hailuoling rare metals deposit

幔源岩浆加热促使下地壳基底发生部分熔融形成初始岩浆，在上升过程中初始岩浆不断发生分异，导致酸性程度逐步升高，稀有金属元素和挥发分逐步在岩浆房中发生富集(图 9(a))；岩浆房内岩浆随着矿物的逐步结晶、冷却逐渐向低温方向演化，形成了下部富堆晶体、中部富碱性长石、上部富云母石英的岩浆房(图 9(a))；残余岩浆中的挥发分不断上升至岩浆房顶部，促使含矿岩浆顶部发生云英岩化，进而形成云英岩化花岗岩、云英岩以及伟晶岩(图 9(b))；其中极富挥发分的熔体-流体共存体系形成后，脱离岩浆房上升至地表一定高度，在外部温度降低、压力减小的不稳定条件下快速冷却结晶，形成各种岩性堆砌在一起的海罗岭矿床(图 9(c))。

5 结论

(1)云母成分显示赣南海罗岭矿床不存在钠长石化花岗岩→云英岩→伟晶岩分异程度逐步增加的演化规律，并且伟晶岩中云母的似筛状结构指示其经历了快速冷却的过程，应该是熔体-流体共存体系经历了缓慢结晶过程，后在不平衡条件下发生快速冷却的产物。

(2)海罗岭矿床与可可托海矿床的岩性组合、岩石结构、矿床组成相似，其成因可能与可可托海矿床具有相似之处，均是富挥发分的岩浆-热液体系脱离深部岩浆房并上升到一定层位快速冷却的产物。

(3)目前，海罗岭稀有金属矿床研究程度较低，加强对其岩石组合、矿物组成、元素赋存状态和稀有金属富集机制的研究，有助于理论提升和找矿突破。如果能通过深钻找到其成矿母岩并对比研究两者的差异性，将进一步提高对此类花岗-伟晶岩型矿床成因机制的理论认识，并进一步提升对此类矿床的找矿勘查能力。

致谢：野外工作期间，得到了原赣南地质大队许建祥总工和江西地质局第七地质大队陈斌锋等专家的指导；文章审查阶段，得到了审稿专家不遗余力的帮助，使文章的证据更加充分并得以顺利发表。在此，全体作者向他们表示诚挚的谢意。

注释：

❶江西有色地质勘查二队. 2019.江西宁都河源—石城海罗岭锡、锂多金属矿整装勘查区矿产调查与找矿预测子项目成果报告(石城县幅)[R]. 赣州: 江西有色地质勘查二队.

References

BENSON T R, COBLE M A, DILLES J H. 2023. Hydrothermal enrichment of lithium in intracaldera illite-bearing claystones[J]. Science Advances, 9(35): eadh8183.

BREITER K, ĎURIŠOVÁ J, HRSTKA T, KORBELOVÁ Z, HLOŽKOVÁ VAŇKOVÁ M, VAŠINOVÁ GALIOVÁ M, KANICKÝ V, RAMBOUSEK P, KNÉSL I, DOBEŠ P, DOSBABA M. 2017a. Assessment of magmatic vs. metasomatic processes in rare-metal granites: a case study of the Cínovec/Zinnwald Sn–W–Li deposit, Central Europe[J]. Lithos, 292-293: 198-217.

BREITER K, VAŇKOVÁ M, GALIOVÁ M V, KORBELOVÁ Z, KANICKÝ V. 2017b. Lithium and trace-element concentrations in trioctahedral micas from granites of different geochemical types measured via laser ablation ICP-MS[J]. Mineralogical Magazine, 81(1): 15-33.

ČERNÝ P, LONDON D, NOVÁK M. 2012. Granitic pegmatites as reflections of their sources[J]. Elements, 8(4): 289-294.

ČERNÝ P, MEINTZER R E, ANDERSON A J. 1985. Extreme fractionation in rare-element granitic pegmatites; selected examples of data and mechanisms[J]. The Canadian Mineralogist, 23(3): 381-421.

CHEN Y J, HAN J S. 2024. Pegmatite-type mineralization of rare metals in the Altai orogenic belt, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 98(5): 1452-1472 (in Chinese with English abstract).

CUI Y Y, ZHAO Z D, JIANG T, YANG J B, DING C, SHENG D, HOU Q Y, HU Z C. 2013. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Early Paleozoic granitoids in southern Jiangxi Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(11): 4011-4024 (in Chinese with English abstract).

ELLIS B S, NEUKAMPF J, BACHMANN O, HARRIS C, FORNI F, MAGNA T, LAURENT O, ULMER P. 2022. Biotite as a recorder of an exsolved Li-rich volatile phase in upper-crustal silicic magma reservoirs[J]. Geology, 50(4): 481-485.

GREW E S. 2020. The minerals of lithium[J]. Elements, 16(4): 235-240.

GREW E S, BOSI F, ROS L, KRISTIANSSON P, GUNTER M E, HåLENIUS U, TRUMBULL R B, YATES M G. 2018. Fluor-elbaite, lepidolite and Ta–Nb oxides from a pegmatite of the 3000 Ma Sinceni Pluton, Swaziland: evidence for lithium–cesium–tantalum (LCT) pegmatites in the mesoarchean[J]. European Journal of Mineralogy, 30(2): 205-218.

GREW E S, HAZEN R M. 2014. Beryllium mineral evolution[J]. American Mineralogist, 99(5-6): 999-1021.

GUO C L, ZHANG B W, ZHENG Y, XU J Q, ZHAO Q Q, YAN J Y, ZHOU R, FU W, HUANG K. 2024. Granite-type lithium deposits in China: important characteristics, metallogenic conditions, and genetic mechanism[J]. Acta Petrologica Sinica, 40(2): 347-403 (in Chinese with English abstract).

HAN Z H, XIONG X, LI J K, YAN Q G, JIANG P F. 2024. Muscovite as a potential tool for magmatic differentiation and identifying Li mineralization in the Jiajika regional pegmatites, West Sichuan[J]. Acta Petrologica Sinica, 40(2): 499-509 (in Chinese with English abstract).

HAN J S, ZHAO Z H, HOLLINGS P, CHEN H Y. 2022. A 50 m. y. melting model for the rare metal–rich Koktokay pegmatite in the Chinese Altai: implications from a newly identified Jurassic granite[J]. GSA Bulletin, 135(5-6): 1467-1479.

HU L Y, HOU S S, LIANG G A. 2015. Study on the metallogenic regularity and prospecting direction in the Hailuoling tantalum-tin polymetallic ore field in Jiangxi[J]. Mineral Exploration, 6(2): 132-141 (in Chinese with English abstract).

LI J, HUANG X L, HE P L, LI W X, YU Y, CHEN L L. 2015. In situ analyses of micas in the Yashan granite, South China: constraints on magmatic and hydrothermal evolutions of W and Ta–Nb bearing granites[J]. Ore Geology Reviews, 65: 793-810.

LI J K, LI P, YAN Q G, WANG D H, REN G L, DING X. 2023. Geology and mineralization of the Songpan-Ganze-West Kunlun pegmatite-type rare-metal metallogenic belt in China: an overview and synthesis[J]. Science China Earth Sciences, 66(8): 1702-1724 (in Chinese with English abstract).

LI J, ZHONG J W, YU Y, HUANG X L. 2013. Insights on magmatism and mineralization from micas in the Xihuashan granite, Jiangxi Province, South China[J]. Geochimica, 42(5): 393-404 (in Chinese with English abstract).

LINNEN R L, VAN LICHTERVELDE M, ČERNÝ P. 2012. Granitic pegmatites as sources of strategic metals[J]. Elements, 8(4): 275-280.

LIU D J, CHEN X W, WU S. 2018. Geological characteristics and prospecting criteria of pegmatite in Shicheng region, Jiangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 32(5): 816-823 (in Chinese with English abstract).

LONDON D. 2005. Granitic pegmatites: an assessment of current concepts and directions for the future[J]. Lithos, 80(1-4): 281-303.

LONDON D. 2009. The origin of primary textures in granitic pegmatites[J]. The Canadian Mineralogist, 47(4): 697-724.

LV Z H, ZHANG H, TANG Y. 2021. Anatexis origin of rare metal/earth pegmatites: evidences from the Permian pegmatites in the Chinese Altai[J]. Lithos, 380-381: 105865.

MIAO Q F. 2018. Characteristics and mineralization of the Madi alkali feldspar granite in eastern Hebei Province[D].

Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).

MIAO Q F, QI Y F. 2020. Occurrence characteristics of Rubidium rare metal elements in Madi granite, eastern Hebei Province[J]. Mineral Exploration, 11(8): 1677-1683 (in Chinese with English abstract).

MÜLLER A, ROMER R L, PEDERSEN R B. 2017. The sveconorwegian pegmatite province – thousands of pegmatites without parental granites[J]. The Canadian Mineralogist, 55(2): 283-315.

MUNK L A, BOUTT D F, HYNEK S A, MORAN B J. 2018. Hydrogeochemical fluxes and processes contributing to the formation of lithium-enriched brines in a hyper-arid continental basin[J]. Chemical Geology, 493: 37-57.

NIE F J, WANG F X, ZHAO Y A, SUN Y, CHAI H. 2013. Geological features and origin of Zhaojinggou Nb-Ta deposit in Wuchuan County, Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 32(4): 730-743 (in Chinese with English abstract).

QIN L X, RAO C, LIN X Q, WU R Q, WANG Q. 2021. Constraints of lithium on the petrogenesis and mineralization of granite in Xianghualing area, Hunan Province[J]. Geological Journal of China Universities, 27(2): 149-162 (in Chinese with English abstract).

QIN K Z, ZHOU Q F, TANG D M, WANG C L, ZHU L Q. 2021. The emplacement mechanism, melt-fluid evolution, rare-element metallogenesis and puzzles of the Koktokay No. 3 pegmatite rare elemental deposit, Altai[J]. Acta Geologica Sinica, 95(10): 3039-3053 (in Chinese with English abstract).

QIU R Z, ZHOU S, CHANG H L, DU S H, PENG S B. 1998. The evolution of Li-bearing micas from Xianghualing granites and their ore-prospecting significance in Hunan[J]. Journal of Guilin Insititute of Technology, 18(2): 145-153 (in Chinese with English abstract).

RODA E, KELLER P, PESQUERA A, FONTAN F. 2007. Micas of the muscovite-lepidolite series from Karibib pegmatites, Namibia[J]. Mineralogical Magazine, 71(1): 41-62.

RODA-ROBLES E, PESQUERA A, GIL-CRESPO P P, TORRES-RUIZ J, DE PARSEVAL P. 2006. Mineralogy and geochemistry of micas from the Pinilla de Fermoselle pegmatite (Zamora, Spain)[J]. European Journal of Mineralogy, 18(3): 369-377.

SIMMONS W, FALSTER A, WEBBER K, RODA-ROBLES E, BOUDREAUX A P, GRASSI L R, FREEMAN G. 2016. Bulk composition of Mt. mica pegmatite, maine, USA: IMPLICATIONS for the origin of an lct type pegmatite by anatexis[J]. The Canadian Mineralogist, 54(4): 1053-1070.

SIRBESCU M L C, LEATHERMAN M A, STUDENT J J, BEEHR A R. 2009. Apatite textures and compositions as records of crystallization processes in the animikie red Ace pegmatite dike, Wisconsin, USA[J]. The Canadian Mineralogist, 47(4): 725-743.

SUN J D, XU M C, TAN G L, LV J S, WU B, ZHANG Y, JIANG X Q. 2023. Geochemical characteristics and metallogenic significance of Huangshan Nb-Ta deposit in northeast Jiangxi Province[J]. East China Geology, 44(1): 28-38 (in Chinese with English abstract).

THOMAS R, DAVIDSON P. 2012. Water in granite and pegmatite-forming melts[J]. Ore Geology Reviews, 46: 32-46.

THOMAS R, DAVIDSON P, BADANINA E. 2009. A melt and fluid inclusion assemblage in beryl from pegmatite in the Orlovka amazonite granite, East Transbaikalia, Russia: implications for pegmatite-forming melt systems[J]. Mineralogy and Petrology, 96(3): 129-140.

THOMAS R, DAVIDSON P, SCHMIDT C. 2011. Extreme alkali bicarbonate- and carbonate-rich fluid inclusions in granite pegmatite from the Precambrian Rønne granite, Bornholm Island, Denmark[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 161(2): 315-329.

THOMAS R, WEBSTER J D, HEINRICH W. 2000. Melt inclusions in pegmatite quartz: complete miscibility between silicate melts and hydrous fluids at low pressure[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 139(4): 394-401.

TISCHENDORF G, GOTTESMANN B, FÖRSTER H J, TRUMBULL R B. 1997. On Li-bearing micas: estimating Li from electron microprobe analyses and an improved diagram for graphical representation[J]. Mineralogical Magazine, 61(409): 809-834.

TROCH J, HUBER C, BACHMANN O. 2022. The physical and chemical evolution of magmatic fluids in near-solidus silicic magma reservoirs: implications for the formation of pegmatites[J]. American Mineralogist, 107(2): 190-205.

VAN LICHTERVELDE M, GRÉGOIRE M, LINNEN R L, BÉZIAT D, SALVI S. 2008. Trace element geochemistry by laser ablation ICP-MS of micas associated with Ta mineralization in the Tanco pegmatite, Manitoba, Canada[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 155(6): 791-806.

VIEIRA R, RODA-ROBLES E, PESQUERA A, LIMA A. 2011. Chemical variation and significance of micas from the Fregeneda-Almendra pegmatitic field (Central-Iberian Zone, Spain and Portugal)[J]. American Mineralogist, 96(4): 637-645.

VILLAROS A, PICHAVANT M. 2019. Mica-liquid trace elements partitioning and the granite-pegmatite connection: the St-Sylvestre complex (Western French Massif Central)[J]. Chemical Geology, 528: 119265.

WANG R C, XIE L, ZHU Z Y, HU H. 2019. Micas: important indicators of granite-pegmatite-related rare-metal mineral-

ization[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(1): 69-75 (in Chinese with English abstract).

WEBBER K L, FALSTER A U, SIMMONS W B, FOORD E E. 1997. The role of diffusion-controlled oscillatory nucleation in the formation of line rock in pegmatite–plite dikes[J]. Journal of Petrology, 38(12): 1777-1791.

WU H H. 2020. Study on metallogenic mechanism of the Zhaojinggou Nb-Ta deposit in North China Craton, Inner Mongolia, China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).

XIONG D Y, WANG X L, XING G F. 2023. A supercontinental cycles perspective for the formation of Precambrian pegmatitic lithium deposits[J]. East China Geology, 44(1): 1-12 (in Chinese with English abstract).

XU Z, ZHANG Y, PAN J Y, ZHANG F R, LOU F S, PENG L L, ZHOU Y, HE B. 2023. Petrogeochemical and geochronological characteristics of Hailuoling granite-type niobium-tantalum deposit in Shicheng, Jiangxi Province and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 97(6): 1874-1899 (in Chinese with English abstract).

XU Z, ZHANG F R, ZHANG F S, LOU F S, ZHANG Y, PAN J Y, WU Z C, HE B, ZHOU Y, FU H M. 2024. Classification of hard rock lithium deposits in Jiangxi Province and its implication for prospecting[J]. East China Geology, 45(1): 62-77 (in Chinese with English abstract).

YIN R, HAN L, HUANG X L, LI J, LI W X, CHEN L L. 2019. Textural and chemical variations of micas as indicators for tungsten mineralization: evidence from highly evolved granites in the Dahutang tungsten deposit, South China[J]. American Mineralogist, 104(7): 949-965.

YUAN L L, WANG Y F, LIU J P, SHAO Y J, LIU Z F, LI B, ZHENG X, DING T, ZHANG T D. 2022. Petro-geochemistry of Late Jurassic highly fractionated granites in the Xianghualing area of Hunan Province: Constraints on petrogenesis and rare-metal mineralization[J]. Acta Petrologica Sinica, 38(7): 2113-2138 (in Chinese with English abstract).

ZHANG L, JIANG S Y. 2021. Two episodic Nb-Ta mineralization events and genesis of the Zhaojinggou rare-metal deposit, north margin of the North China Craton[J]. Ore Geology Reviews, 131: 103994

ZHOU Q F, QIN K Z, TANG D M, DING J G, GUO Z L. 2013. Mineralogy and significance of micas and feldspars from the Koktokay No. 3 pegmatitic rare-element deposit, Altai[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(9): 3004-3022 (in Chinese with English abstract).

ZHOU Q F, QIN K Z, TANG D M, WANG C L, TIAN Y, SAKYI P A. 2015. Mineralogy of the Koktokay No. 3 pegmatite, Altai, NW China: implications for evolution and melt–fluid processes of rare-metal pegmatites[J]. European Journal of Mineralogy, 27(3): 433-457.

附中文参考文献

陈衍景, 韩金生. 2024. 新疆阿尔泰造山带伟晶岩型稀有金属矿床成矿作用[J]. 地质学报, 98(5): 1452-1472.

崔圆圆, 赵志丹, 蒋婷, 杨金豹, 丁聪, 盛丹, 侯青叶, 胡兆初. 2013. 赣南早古生代晚期花岗岩类年代学、地球化学及岩石成因[J]. 岩石学报, 29(11): 4011-4024.

郭春丽, 张斌武, 郑义, 许箭琪, 赵迁迁, 闫金禹, 周睿, 符伟, 黄可. 2024. 中国花岗岩型锂矿床: 重要特征、成矿条件及形成机制[J]. 岩石学报, 40(2): 347-403.

韩志辉, 熊欣, 李建康, 严清高, 姜鹏飞. 2024. 川西甲基卡区域伟晶岩分异演化及锂成矿过程: 来自白云母矿物学的约束[J]. 岩石学报, 40(2): 499-509.

胡论元, 侯珊珊, 梁国安. 2015. 江西海罗岭钽锡多金属矿田成矿规律及找矿方向探讨[J]. 矿产勘查, 6(2): 132-141.

李建康, 李鹏, 严清高, 王登红, 任广利, 丁欣. 2023. 松潘—甘孜—西昆仑花岗伟晶岩型稀有金属成矿带成矿规律[J]. 中国科学: 地球科学, 53(8): 1718-1740.

李洁, 钟军伟, 于洋, 黄小龙. 2013. 赣南西华山花岗岩的云母成分特征及其对岩浆演化与成矿过程的指示[J]. 地球化学, 42(5): 393-404.

刘东杰, 陈新卫, 吴素. 2018. 江西石城地区含矿伟晶岩地质特征及找矿标志[J]. 矿产与地质, 32(5): 816-823.

苗群峰. 2018. 冀东麻地碱长花岗岩特征及其成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学 (北京).

苗群峰, 齐云飞. 2020. 冀东麻地岩体铷等稀有金属元素赋存特征[J]. 矿产勘查, 11(8): 1677-1683.

聂凤军, 王丰翔, 赵宇安, 孙艳, 柴华. 2013. 内蒙古赵井沟大型铌钽矿床地质特征及成因[J]. 矿床地质, 32(4): 730-743.

覃莉茜, 饶灿, 林晓青, 吴润秋, 王琪. 2021. 湖南香花岭地区花岗岩中锂对成岩成矿的制约[J]. 高校地质学报, 27(2): 149-162.

秦克章, 周起凤, 唐冬梅, 王春龙, 朱丽群. 2021. 阿尔泰可可托海 3 号脉花岗伟晶岩侵位机制、熔-流体演化、稀有金属富集机理及待解之谜[J]. 地质学报, 95(10): 3039-3053.

邱瑞照, 周肃, 常海亮, 杜绍华, 彭松柏. 1998. 湖南香花岭花岗岩含锂云母类演化及其找矿意义[J]. 桂林工学院学报, 18(2): 145-153.

孙建东, 徐敏成, 谭桂丽, 吕劲松, 武彬, 张勇, 江小强. 2023. 赣东北黄山铌钽矿床成矿岩体地球化学特征及成矿意义[J]. 华东地质, 44(1): 28-38.

王汝成, 谢磊, 诸泽颖, 胡欢. 2019. 云母: 花岗岩-伟晶岩稀有金属成矿作用的重要标志矿物[J]. 岩石学报, 35(1): 69-75.

吴欢欢. 2020. 内蒙古赵井沟铌钽矿床成矿机制研究[D]. 北

京: 中国地质大学 (北京).
熊定一, 王孝磊, 邢光福. 2023. 从超大陆旋回看前寒武纪伟晶岩型锂矿的形成[J]. 华东地质, 44(1): 1-12.
徐喆, 张勇, 潘家永, 张芳荣, 楼法生, 彭琳琳, 周渝, 贺彬. 2023. 江西石城海罗岭花岗岩型铌钽矿床岩石地球化学、年代学特征及其地质意义[J]. 地质学报, 97(6): 1874-1899.
徐喆, 张芳荣, 张福神, 楼法生, 张勇, 潘家永, 吴正昌, 贺彬, 周渝, 符海明. 2024. 江西硬岩型锂矿类型划分及其找矿启示[J]. 华东地质, 45(1): 62-77.
袁玲玲, 王祎帆, 刘建平, 邵拥军, 刘忠法, 李斌, 郑旭, 丁涛, 张天栋. 2022. 湖南香花岭晚侏罗世高分异花岗岩的岩石地球化学特征: 岩石成因与稀有金属成矿效应[J]. 岩石学报, 38(7): 2113-2138.
周起凤, 秦克章, 唐冬梅, 丁建刚, 郭正林. 2013. 阿尔泰可可托海 3 号脉伟晶岩型稀有金属矿床云母和长石的矿物学研究及意义[J]. 岩石学报, 29(9): 3004-3022.

Genesis of the Mesozoic Hailuoling granite-pegmatite rare-metal deposit in southern Jiangxi Province—based on the trace-element study in mica

XU Jianqi[1,2], GUO Chunli[1,3], YAN Jinyu[1], ZHANG Binwu[1], ZHAO Qianqian[1], ZHOU Rui[4]

(1. *MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment*, *Institute of Mineral Resources*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100037, *China*; 2. *School of Resources and Environmental Engineering*, *Hefei University of Technology*, *Hefei* 230009, *Anhui*, *China*; 3. *SinoProbe Laboratory*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100094, *China*; 4. *China University of Geosciences* (*Beijing*), *Beijing* 100037, *China*)

Abstract: The Hailuoling deposit, which is located in Shicheng County, southern Jiangxi, is a granitic pegmatite-type Nb-Ta-Zr-W-Sn-Li-Rb polymetallic deposit formed in the Mesozoic. Previous studies have focused on the geological characteristics of the deposit, but have not elucidated its formation mechanism yet. This research analyzed the micas in the fine-grained albite granite, greisenized granite, greisen, and pegmatite in the Hailuoling deposit by electron probe microanalysis (EPMA) and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). The results show that micas in the fine-grained albite granite are dominated by lepidolite and zinnwaldite. In greisenized granite and greisen, micas are composed of protolithionite. The micas in pegmatite are mainly zinnwaldite and protolithionite. These rocks did not evolve according to the order of gradual increase of lithium content from granite → greisenized granite → greisen → pegmatite. Furthermore, compared to the greisenized granite and greisen, the micas in the fine-grained albite granite contain higher Rb, Li, and F but a lower K/Rb ratio. The regularity of major and trace elements possibly indicates a product of a more intense fractionation process of the same magmatic source. The sieve-like textures in the pegmatite suggested that the deposit experienced a transition from slow nucleation in the early stage to rapid undercooling in the later stage. By comparing the characteristics of the deposits and minerals in pegmatite between Hailuoling deposit and Koktokay deposit, it is inferred that the two deposits have similar ore-forming mechanism. Both of them experienced crystal fractionation dominated by melts, fluid exsolution, and the coexistence of melts and fluids. Some minerals crystallized under slow undercooling and solidified under rapid cooling conditions during the emplacement of the melt-fluid coexistence system, forming the granitic pegmatite-type deposit far away from the magma chamber and characterized with a mixture of various rock types.

Key words: rare-metal deposit; granite-pegmatite type; trace elements of micas; Hailuoling; Koktokay; southern Jiangxi

附表1 赣南海罗岭矿床云母电子探针分析完整结果/%

Supplementary Tab.1 Complete electron microprobe analysis results of micas from Hailuoling deposit/%

样品岩性	测试点	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	F	Cl	Li_2O*	H_2O*	O=F,Cl	Total
钠长石化花岗岩	HLL114-1	50.62	0.09	21.60	10.73	0.78	0.09	0.00	0.08	9.52	6.10	0.01	3.77	1.55	2.57	102.39
钠长石化花岗岩	HLL114-2	45.92	0.07	20.70	10.97	1.38	0.00	0.00	0.14	10.16	5.21	0.00	3.38	1.68	2.19	97.41
钠长石化花岗岩	HLL114-3	48.46	0.08	20.78	9.71	1.34	0.03	0.00	0.11	10.43	5.89	0.01	4.53	1.54	2.48	100.42
钠长石化花岗岩	HLL114-4	49.17	0.12	20.12	10.10	1.27	0.00	0.01	0.16	10.22	5.54	0.00	2.94	1.63	2.33	98.94
钠长石化花岗岩	HLL114-5	47.83	0.12	22.16	11.78	1.27	0.02	0.00	0.11	10.06	6.13	0.00	3.66	1.45	2.58	102.00
钠长石化花岗岩	HLL114-6	48.96	0.13	21.49	10.78	1.43	0.01	0.00	0.17	10.02	5.75	0.01	3.86	1.65	2.42	101.85
钠长石化花岗岩	HLL114-7	52.38	0.09	19.40	8.69	0.91	0.00	0.00	0.10	10.46	5.42	0.00	4.46	1.87	2.28	101.51
钠长石化花岗岩	HLL114-8	48.00	0.11	21.88	9.86	1.34	0.00	0.00	0.26	10.18	5.96	0.00	3.75	1.50	2.51	100.32
云英岩	HLL212-1	41.29	0.00	20.65	17.88	1.07	0.00	0.00	0.08	9.69	4.49	0.01	1.71	1.81	1.89	96.79
云英岩	HLL212-2	41.94	0.02	20.23	17.57	0.93	0.00	0.00	0.02	10.16	4.05	0.01	1.80	2.04	1.71	97.07
云英岩	HLL212-3	41.35	0.03	20.87	18.52	1.16	0.00	0.01	0.08	9.95	4.20	0.01	1.75	1.99	1.77	98.14
云英岩	HLL212-4	41.03	0.03	20.81	18.08	1.19	0.00	0.00	0.11	10.08	4.53	0.02	1.68	1.80	1.91	97.45
云英岩	HLL212-5	41.81	0.00	20.10	18.15	1.07	0.00	0.00	0.08	9.75	4.33	0.00	1.43	1.88	1.82	96.78
云英岩	HLL212-6	41.30	0.01	20.85	18.18	0.83	0.00	0.00	0.01	10.00	3.57	0.00	1.74	2.27	1.50	97.24
云英岩	HLL212-7	41.95	0.06	20.55	17.60	0.94	0.00	0.00	0.04	9.95	4.04	0.00	1.82	2.06	1.70	97.31
云英岩	HLL212-8	41.28	0.02	20.51	17.70	1.09	0.00	0.01	0.11	9.98	4.91	0.01	1.72	1.61	2.07	96.87
云英岩	HLL212-9	41.61	0.02	19.57	17.55	0.93	0.00	0.01	0.07	10.14	4.46	0.00	1.52	1.78	1.88	95.78
云英岩	HLL212-10	40.63	0.02	20.56	18.48	0.96	0.00	0.01	0.09	9.96	3.99	0.01	1.83	2.03	1.68	96.90
云英岩	HLL212-11	40.40	0.01	20.11	16.78	0.99	0.00	0.00	0.06	9.81	4.37	0.00	1.64	1.77	1.84	94.09
云英岩	HLL212-12	41.21	0.04	20.61	17.79	1.02	0.00	0.00	0.04	10.20	3.67	0.01	1.72	2.20	1.55	96.96
云英岩	HLL212-13	41.26	0.02	20.09	17.94	1.07	0.00	0.00	0.04	10.18	4.05	0.00	1.81	2.01	1.71	96.75
云英岩	HLL212-14	42.07	0.02	19.85	17.08	0.86	0.00	0.00	0.06	10.05	4.77	0.01	1.62	1.66	2.01	96.03
云英岩	HLL212-15	40.04	0.04	20.84	18.74	0.91	0.00	0.00	0.07	9.96	3.41	0.01	1.62	2.28	1.44	96.49
云英岩	HLL212-16	41.59	0.01	19.55	16.29	0.84	0.00	0.00	0.03	10.03	4.37	0.00	1.70	1.79	1.84	94.37
云英岩	HLL212-17	42.26	0.00	20.09	17.04	1.07	0.00	0.00	0.11	10.22	4.25	0.00	1.69	1.94	1.79	96.88
云英岩	HLL222-1	40.53	0.16	20.55	18.48	0.99	0.21	0.00	0.06	9.99	3.49	0.01	1.34	2.25	1.47	96.60

续附表1

样品岩性	测试点	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	F	Cl	Li_2O*	H_2O*	O=F,Cl	Total
云英岩	HLL222-2	40.17	0.21	19.86	20.29	0.94	0.26	0.00	0.05	9.92	3.46	0.01	1.14	2.24	1.46	97.08
云英岩	HLL222-3	40.72	0.26	20.37	18.27	1.11	0.18	0.00	0.07	9.97	4.24	0.01	1.19	1.89	1.78	96.47
云英岩	HLL222-4	42.48	0.06	19.79	16.33	0.87	0.20	0.00	0.07	10.12	4.65	0.01	1.67	1.74	1.96	96.02
云英岩	HLL222-5	40.01	0.20	20.61	19.47	1.22	0.22	0.00	0.09	10.10	3.24	0.00	1.32	2.38	1.36	97.51
云英岩	HLL222-6	40.42	0.12	20.60	18.30	1.18	0.20	0.00	0.07	10.06	3.98	0.01	1.43	2.02	1.68	96.71
云英岩	HLL222-7	41.16	0.22	20.22	18.28	1.01	0.16	0.00	0.07	10.11	4.54	0.02	1.53	1.78	1.91	97.18
云英岩	HLL222-8	42.44	0.11	19.81	16.33	1.02	0.21	0.00	0.07	9.96	4.28	0.00	1.63	1.91	1.80	95.97
云英岩	HLL222-9	41.18	0.33	19.53	17.84	0.99	0.20	0.01	0.07	9.92	3.98	0.02	1.28	1.99	1.68	95.64
云英岩	HLL222-10	40.03	0.20	20.02	18.76	1.01	0.18	0.00	0.08	9.95	3.88	0.02	1.33	2.02	1.64	95.84
云英岩	HLL222-11	40.25	0.23	20.08	18.39	0.93	0.23	0.00	0.06	9.94	3.89	0.02	1.41	2.02	1.64	95.79
云英岩	HLL222-12	39.89	0.08	19.85	19.60	0.95	0.19	0.00	0.12	10.00	3.10	0.00	1.48	2.40	1.30	96.36
云英岩	HLL222-13	39.57	0.11	19.78	18.72	0.73	0.13	0.00	0.08	9.95	3.50	0.02	1.35	2.15	1.48	94.59
云英岩	HLL222-14	40.35	0.36	20.06	19.83	0.91	0.25	0.00	0.07	9.86	3.21	0.02	1.44	2.39	1.36	97.39
云英岩	HLL222-15	40.80	0.22	19.95	19.38	0.97	0.26	0.00	0.09	9.51	3.81	0.02	1.50	2.11	1.61	97.01
云英岩	HLL222-16	40.28	0.20	20.26	17.84	1.10	0.20	0.00	0.04	9.95	4.25	0.02	1.48	1.86	1.79	95.69
云英岩	HLL222-17	39.74	0.17	20.35	20.09	1.10	0.17	0.00	0.14	9.63	4.24	0.03	1.53	1.88	1.79	97.28
云英岩	HLL222-18	40.42	0.20	20.37	17.36	1.08	0.19	0.00	0.10	9.94	3.75	0.02	1.53	2.10	1.58	95.46
云英岩	HLL222-19	40.46	0.15	20.62	18.32	1.05	0.19	0.00	0.07	10.03	3.71	0.01	1.48	2.15	1.56	96.67
云英岩	HLL222-20	39.72	0.15	20.05	18.72	1.16	0.21	0.00	0.09	9.60	4.48	0.00	1.38	1.72	1.88	95.40
云英岩	HLL222-21	40.68	0.25	20.44	17.97	1.16	0.17	0.00	0.05	10.09	4.41	0.01	1.54	1.82	1.86	96.73
云英岩	HLL222-22	41.53	0.17	20.10	17.13	1.08	0.10	0.00	0.09	9.86	4.12	0.01	1.63	1.97	1.74	96.05
云英岩	HLL222-23	39.27	0.19	20.16	20.15	0.77	0.26	0.00	0.11	9.79	3.90	0.03	1.50	2.01	1.65	96.49
伟晶岩	HLL322-1	45.21	0.08	21.89	15.16	1.06	0.03	0.00	0.11	9.75	4.80	0.02	2.58	1.93	2.02	100.59
伟晶岩	HLL322-2	44.31	0.07	21.60	14.97	1.04	0.03	0.02	0.18	9.93	5.02	0.02	2.44	1.75	2.12	99.26
伟晶岩	HLL322-3	43.15	0.07	21.49	14.98	0.98	0.03	0.00	0.10	10.10	4.10	0.02	2.40	2.12	1.73	97.79
伟晶岩	HLL322-4	43.21	0.10	21.77	15.62	1.01	0.00	0.00	0.15	9.89	4.69	0.03	2.48	1.87	1.98	98.82

续附表1

样品岩性	测试点	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	F	Cl	Li_2O*	H_2O*	O=F,Cl	Total
伟晶岩	HLL322-5	44.83	0.05	21.66	15.08	0.98	0.00	0.00	0.15	9.92	5.44	0.02	2.45	1.58	2.30	99.87
伟晶岩	HLL322-6	44.26	0.03	21.78	14.91	0.92	0.04	0.00	0.18	9.91	5.10	0.03	2.51	1.72	2.15	99.24
伟晶岩	HLL322-7	44.44	0.10	20.75	13.99	0.79	0.00	0.00	0.20	10.07	4.73	0.02	2.53	1.84	1.99	97.46
伟晶岩	HLL322-8	45.18	0.14	21.78	15.19	0.90	0.00	0.00	0.24	9.90	5.20	0.01	2.60	1.74	2.19	100.70
伟晶岩	HLL322-9	43.25	0.08	21.75	15.68	1.10	0.04	0.00	0.11	9.99	4.25	0.01	2.49	2.09	1.79	99.04
伟晶岩	HLL322-10	43.62	0.10	21.83	15.42	1.02	0.02	0.01	0.19	9.66	4.69	0.00	2.54	1.90	1.97	99.01
伟晶岩	HLL322-11	44.41	0.07	21.59	15.07	0.76	0.02	0.01	0.08	10.26	5.02	0.01	2.49	1.76	2.12	99.43
伟晶岩	HLL322-12	42.29	0.08	21.97	15.60	0.70	0.00	0.00	0.14	9.93	3.63	0.02	2.41	2.32	1.53	97.55
伟晶岩	HLL322-13	43.68	0.00	20.90	14.41	0.70	0.00	0.02	0.16	9.91	4.96	0.02	2.70	1.70	2.09	97.06
伟晶岩	HLL322-14	42.04	0.08	21.99	16.32	0.75	0.04	0.01	0.22	9.65	4.64	0.03	2.30	1.84	1.96	97.92
伟晶岩	HLL322-15	43.01	0.01	22.33	15.71	0.78	0.00	0.00	0.15	10.18	4.91	0.02	2.46	1.78	2.07	99.25
伟晶岩	HLL323-1	43.12	0.02	21.65	15.66	0.78	0.04	0.00	0.17	10.04	5.10	0.01	2.60	1.67	2.15	98.72
伟晶岩	HLL323-2	43.25	0.07	22.12	15.64	0.72	0.02	0.01	0.18	9.96	5.24	0.01	2.48	1.63	2.21	99.11
伟晶岩	HLL323-3	46.58	0.07	21.27	13.13	0.66	0.04	0.00	0.21	9.79	5.56	0.01	2.71	1.57	2.34	99.26
伟晶岩	HLL323-4	43.74	0.07	21.94	15.62	0.98	0.03	0.00	0.19	10.05	4.89	0.00	2.52	1.82	2.06	99.79
伟晶岩	HLL323-5	45.46	0.08	21.17	14.27	1.01	0.01	0.00	0.22	10.04	4.74	0.01	2.63	1.93	2.00	99.56
伟晶岩	HLL323-6	44.41	0.12	21.62	14.80	0.83	0.03	0.01	0.17	9.96	4.79	0.00	2.62	1.88	2.02	99.22
伟晶岩	HLL323-7	44.31	0.08	21.55	15.03	0.79	0.06	0.00	0.15	10.04	5.39	0.01	2.60	1.58	2.27	99.31
伟晶岩	HLL323-8	43.15	0.00	22.00	15.74	0.85	0.02	0.00	0.14	10.10	4.66	0.00	2.45	1.90	1.96	99.04
伟晶岩	HLL323-9	44.77	0.03	21.26	14.26	0.64	0.01	0.00	0.15	10.07	5.19	0.01	2.66	1.67	2.19	98.53
伟晶岩	HLL323-10	44.74	0.00	21.75	14.67	0.73	0.00	0.01	0.23	10.21	5.35	0.00	2.69	1.63	2.25	99.76
伟晶岩	HLL323-11	42.98	0.02	21.67	15.97	0.78	0.00	0.00	0.14	9.78	5.71	0.00	2.60	1.38	2.40	98.65
伟晶岩	HLL323-12	42.36	0.06	22.13	16.44	0.77	0.01	0.00	0.14	9.95	4.31	0.02	2.57	2.04	1.82	98.98
伟晶岩	HLL323-13	44.77	0.04	21.29	14.93	0.75	0.02	0.00	0.12	9.99	5.34	0.01	2.63	1.62	2.25	99.25
伟晶岩	HLL323-14	45.26	0.00	21.20	14.85	0.65	0.03	0.00	0.13	9.75	5.15	0.01	2.73	1.72	2.17	99.31
伟晶岩	HLL323-15	44.38	0.06	22.08	15.78	0.74	0.00	0.00	0.19	9.94	5.30	0.00	2.20	1.65	2.23	100.08

续附表1

样品岩性	测试点	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	F	Cl	Li_2O*	H_2O*	O=F,Cl	Total
伟晶岩	HLL323-16	43.29	0.03	21.53	16.06	0.81	0.00	0.00	0.18	10.00	5.13	0.01	2.76	1.68	2.16	99.32
伟晶岩	HLL323-17	44.77	0.10	21.47	14.84	0.91	0.02	0.00	0.18	9.99	5.50	0.01	2.68	1.55	2.32	99.70
伟晶岩	HLL323-18	44.31	0.05	21.69	13.75	0.80	0.02	0.00	0.20	10.04	5.18	0.00	2.66	1.66	2.18	98.18
伟晶岩	HLL323-19	45.24	0.05	21.06	13.56	0.76	0.06	0.00	0.16	10.02	5.34	0.03	2.69	1.60	2.26	98.31
云英岩化花岗岩	HLL422-1	40.15	0.24	20.39	18.90	1.03	0.00	0.00	0.06	9.69	3.26	0.02	1.57	2.34	1.38	96.27
云英岩化花岗岩	HLL422-2	40.18	0.02	20.36	18.05	1.06	0.00	0.00	0.08	9.88	3.57	0.02	1.40	2.16	1.51	95.26
云英岩化花岗岩	HLL422-3	41.13	0.03	20.64	17.83	1.06	0.00	0.02	0.04	9.56	3.21	0.01	1.76	2.41	1.35	96.35
云英岩化花岗岩	HLL422-4	40.82	0.02	20.64	18.43	0.92	0.00	0.00	0.06	10.10	4.01	0.02	1.66	2.03	1.69	97.03
云英岩化花岗岩	HLL422-5	40.48	0.00	20.76	18.04	0.91	0.01	0.00	0.10	9.94	3.04	0.01	1.68	2.46	1.28	96.15
云英岩化花岗岩	HLL422-6	39.58	0.36	20.28	18.30	0.90	0.03	0.01	0.08	9.69	2.82	0.01	1.66	2.51	1.19	95.02
云英岩化花岗岩	HLL422-7	39.92	0.36	20.40	19.32	1.08	0.05	0.00	0.08	9.69	3.93	0.03	1.84	2.04	1.66	97.10
云英岩化花岗岩	HLL422-8	40.88	0.38	21.13	18.32	0.92	0.01	0.00	0.08	9.46	3.27	0.02	1.52	2.39	1.38	96.99
云英岩化花岗岩	HLL422-9	41.20	0.00	20.78	17.24	1.02	0.00	0.00	0.10	10.03	4.09	0.01	1.46	1.98	1.72	96.18
云英岩化花岗岩	HLL422-10	40.61	0.02	20.35	18.19	0.97	0.01	0.00	0.08	9.88	3.27	0.01	1.52	2.34	1.38	95.87
云英岩化花岗岩	HLL422-11	40.04	0.00	20.19	17.92	0.87	0.02	0.01	0.13	9.57	3.98	0.03	1.60	1.95	1.68	94.62
云英岩化花岗岩	HLL422-12	39.82	0.00	20.03	17.92	0.80	0.00	0.01	0.13	9.75	4.16	0.02	1.60	1.85	1.75	94.33
云英岩化花岗岩	HLL422-13	39.94	0.04	20.43	18.40	0.94	0.00	0.00	0.14	9.89	4.50	0.00	1.15	1.71	1.90	95.23

附表2 赣南海罗岭矿床云母LA-ICP-MS分析完整结果/10^{-6}

Supplementary Tab.2 Complete LA-ICP-MS data for micas from Hailuoling deposit/10^{-6}

测试点	Li	Be	Sc	Mn	Zn	Ga	Rb	Nb	Cd	In	Sn	Cs	Ba	Ta	W	Tl	Pb	Ta/Nb	Nb/Ta	Sn/W	K/Rb
钠长石化花岗岩HLL114																					
1	17 598	34.67	34.43	6 118	1 283	84.03	10 859	44.71	3.60	1.00	63.65	68.65	13.29	102.30	36.59	18.91	1.90	2.29	0.44	1.74	7.36
2	15 750	28.75	28.82	5 233	1 076	72.76	9 292	30.50	2.68	0.99	53.96	68.85	9.33	61.96	25.04	17.46	1.74	2.03	0.49	2.15	7.31
3	21 134	38.64	27.64	7 441	1 512	70.34	15 077	38.88	2.30	0.88	56.30	141.69	6.29	39.50	29.21	27.07	1.36	1.02	0.98	1.93	4.96
4	13 741	24.06	30.64	5 675	1 247	103.05	8 971	42.74	3.40	0.93	66.08	42.51	10.00	99.08	31.63	16.02	4.30	2.32	0.43	2.09	7.70
5	17 079	32.16	33.72	7 773	1 636	65.34	10 389	50.30	2.97	0.86	49.56	50.49	-	120.31	41.65	16.50	2.30	2.39	0.42	1.19	7.01
6	18 024	27.02	35.22	8 233	1 661	65.51	10 348	44.48	2.98	0.99	69.94	48.05	5.05	124.04	45.17	16.78	1.31	2.79	0.36	1.55	7.27
7	20 817	43.04	30.26	7 069	1 466	63.63	10 360	33.07	-	0.89	55.56	48.08	12.31	57.62	26.18	18.43	1.31	1.74	0.57	2.12	7.78
8	17 503	33.95	32.75	7 002	1 421	71.24	10 536	36.45	-	-	62.61	48.46	-	106.84	44.55	22.64	2.33	2.93	0.34	1.41	7.10
云英岩HLL212																					
1	7 976	25.06	14.83	6 245	1 624	160.52	7 574	84.27	4.42	2.24	125.21	274.97	111.03	130.30	9.73	29.57	4.31	1.55	0.65	12.87	9.52
2	8 421	23.15	14.48	6 702	1 525	159.66	8 213	105.77	3.69	2.27	128.21	415.31	127.30	207.47	10.51	32.17	4.76	1.96	0.51	12.20	9.35
3	8 145	20.32	15.51	6 887	1 569	167.20	7 784	102.25	5.48	2.40	152.92	298.81	140.27	167.68	9.49	30.21	5.86	1.64	0.61	16.12	9.44
4	7 851	21.26	13.94	6 596	1 610	153.30	7 279	87.45	5.42	2.50	133.94	210.06	140.45	151.09	12.97	28.67	4.13	1.73	0.58	10.33	10.49
5	6 653	15.64	11.66	5 648	1 044	151.80	6 446	68.28	7.66	2.35	180.53	267.56	106.17	135.88	11.97	24.85	3.77	1.99	0.50	15.08	11.42
6	8 110	37.74	14.86	6 272	1 556	142.93	8 961	47.03	3.80	1.84	84.10	369.24	96.84	83.87	7.93	27.46	5.38	1.78	0.56	10.60	8.09
7	8 514	23.49	11.65	6 615	1 679	113.21	7 108	21.56	1.72	1.98	51.54	204.10	130.55	32.48	5.81	23.75	4.12	1.51	0.66	8.88	10.32
8	8 028	37.61	6.71	5 620	1 079	155.35	8 832	13.94	4.21	1.30	89.59	468.08	288.34	19.06	3.53	29.65	3.71	1.37	0.73	25.40	8.06
9	7 072	18.69	12.01	5 275	1 216	133.45	6 416	68.79	4.03	2.20	104.50	219.75	125.74	161.80	9.56	20.53	4.73	2.35	0.43	10.93	11.16
10	8 536	44.80	8.51	5 761	1 167	187.55	9 518	22.74	2.31	-	55.04	435.20	83.73	44.32	5.72	24.61	4.04	1.95	0.51	9.62	6.82
11	7 660	22.51	13.43	5 771	1 553	152.00	7 184	85.35	4.85	2.44	121.63	244.09	81.82	157.81	10.43	20.28	4.47	1.85	0.54	11.66	9.12
12	8 021	20.37	14.35	5 950	1 572	132.06	6 692	35.39	3.00	2.42	90.42	223.25	210.15	54.36	8.77	16.58	3.08	1.54	0.65	10.31	9.99
13	8 437	28.17	14.57	5 384	1 265	160.00	7 999	68.46	3.65	1.82	90.88	315.58	57.24	136.58	12.29	14.69	5.37	1.99	0.50	7.39	7.91
14	7 565	16.58	14.62	6 062	1 356	128.68	6 827	80.23	3.71	2.56	138.80	165.12	170.19	158.74	12.94	15.28	4.24	1.98	0.51	10.73	9.45
15	7 539	32.18	8.30	6 018	1 152	105.12	7 896	26.48	-	3.22	87.30	458.68	283.73	44.88	4.30	15.92	2.68	1.69	0.59	20.29	7.64
16	7 951	24.31	15.19	6 944	1 596	146.05	7 656	100.21	4.92	2.78	141.63	239.55	155.09	203.94	12.09	15.55	4.29	2.04	0.49	11.71	8.39

续附表2

测试点	Li	Be	Sc	Mn	Zn	Ga	Rb	Nb	Cd	In	Sn	Cs	Ba	Ta	W	Tl	Pb	Ta/Nb	Nb/Ta	Sn/W	K/Rb
17	7 890	19.89	15.51	7 268	1 786	122.40	7 398	26.37	2.41	2.42	75.32	186.80	180.03	42.71	6.97	14.97	3.45	1.62	0.62	10.81	8.93
云英岩HLL222																					
1	6 250	12.38	19.49	5 759	1 603	134.57	7 291	111.72	6.38	3.45	167.39	308.43	344.09	81.89	8.88	16.82	5.11	0.73	1.36	18.86	8.92
2	5 305	21.01	14.15	2 941	824	102.57	7 231	39.76	7.03	3.47	188.30	363.85	330.27	33.42	3.58	18.56	9.02	0.84	1.19	52.53	8.52
3	5 546	17.26	17.37	4 061	1 102	134.36	7 347	72.97	7.11	2.51	171.35	318.09	258.69	44.76	6.07	94.55	6.56	0.61	1.63	28.24	10.19
4	7 810	21.06	17.52	6 805	2 128	123.43	7 083	84.35	8.16	5.01	181.49	198.53	478.01	98.02	14.49	102.92	6.41	1.16	0.86	12.53	11.41
5	6 158	16.97	18.40	5 537	1 626	136.27	6 800	77.53	8.31	2.88	150.80	226.82	364.54	59.20	9.70	84.29	2.75	0.76	1.31	15.55	11.18
6	6 683	19.26	21.50	5 452	1 771	132.75	8 293	62.94	7.24	2.53	125.34	454.19	244.96	32.39	3.38	77.15	13.95	0.51	1.94	37.11	9.31
7	7 120	24.07	13.90	5 978	1897	121.30	6 919	82.10	9.07	5.74	170.92	227.81	500.76	103.40	13.79	45.25	4.93	1.26	0.79	12.40	10.96
8	7 588	17.02	18.45	6 799	2 317	139.07	7 758	133.50	6.79	3.54	149.50	285.93	350.91	103.55	9.24	40.98	5.48	0.78	1.29	16.17	9.99
9	5 989	14.18	22.06	5 395	2 056	135.24	7 031	153.12	5.55	3.36	143.27	238.30	291.68	111.14	15.28	27.57	9.21	0.73	1.38	9.38	10.80
10	6 199	14.68	19.12	6 546	2 146	134.65	7 760	83.52	5.42	2.66	131.98	281.88	345.21	45.80	7.91	28.91	4.68	0.55	1.82	16.68	9.49
11	6 566	14.98	19.07	6 124	2033	131.44	7 195	79.63	5.18	2.73	145.54	275.60	347.10	53.67	10.50	23.58	8.46	0.67	1.48	13.86	9.94
12	6 906	16.65	17.10	6 522	1962	130.12	7 110	103.24	6.15	3.87	164.28	218.76	607.09	51.23	11.81	22.40	3.31	0.50	2.02	13.91	10.30
13	6 289	15.38	19.33	7 125	2 316	118.40	6 699	121.62	6.84	2.90	177.89	417.52	326.42	116.24	14.13	26.56	3.46	0.96	1.05	12.59	11.08
14	6 714	17.26	19.66	6 403	1 793	131.82	6 702	118.55	6.92	3.57	177.57	232.33	375.36	104.54	14.59	23.83	2.95	0.88	1.13	12.17	11.18
15	7 008	18.84	18.05	6 708	1859	131.60	7 309	93.62	9.59	4.85	256.64	210.58	528.41	93.09	15.01	24.07	3.31	0.99	1.01	17.10	10.30
16	6 920	15.16	20.94	5 388	1 662	128.29	7 016	162.61	8.50	4.66	247.26	179.28	409.16	117.53	12.51	20.44	4.01	0.72	1.38	19.76	10.28
17	7 128	18.92	20.45	6 678	1978	123.90	6 957	168.11	5.18	3.19	157.02	252.34	423.89	119.70	11.07	18.97	4.07	0.71	1.40	14.19	10.19
18	7 148	18.00	17.90	6 268	1946	138.83	6 919	157.13	8.36	3.59	208.78	228.87	396.09	149.80	14.62	17.00	6.94	0.95	1.05	14.28	10.00
19	6 897	17.82	17.77	7 228	2 239	123.46	6 882	107.99	5.39	4.58	143.65	196.40	468.80	93.17	10.14	16.35	3.42	0.86	1.16	14.16	9.79
20	6 429	17.49	18.18	6 480	1873	139.06	6 800	78.56	5.25	2.77	135.09	215.12	326.16	59.85	11.37	15.58	3.20	0.76	1.31	11.89	9.69
21	7 201	17.64	17.62	6 282	1930	134.03	6 888	101.41	7.30	3.82	188.93	240.01	400.30	84.50	14.43	15.74	5.49	0.83	1.20	13.09	9.67
22	7 622	17.25	16.85	7 125	2 330	129.75	6 946	93.41	4.46	4.64	146.46	214.31	299.23	70.03	9.49	18.15	4.08	0.75	1.33	15.44	9.87
23	6 984	20.98	14.09	7 331	2 101	113.18	6 520	74.03	8.37	4.93	167.48	221.52	514.78	91.29	14.17	74.67	4.99	1.23	0.81	11.82	11.25

续附表2

测试点	Li	Be	Sc	Mn	Zn	Ga	Rb	Nb	Cd	In	Sn	Cs	Ba	Ta	W	Tl	Pb	Ta/Nb	Nb/Ta	Sn/W	K/Rb
伟晶岩HLL322																					
1	12 062	30.26	38.17	6 610	1 655	120.83	6 362	167.96	7.03	0.82	120.90	93.94	44.69	40.41	29.68	59.40	1.57	0.24	4.16	4.07	12.57
2	11 373	26.28	37.53	7 092	1904	101.76	7 202	135.89	7.55	1.06	119.17	177.70	62.61	27.34	20.98	52.73	3.01	0.20	4.97	5.68	11.32
3	11 183	22.92	35.46	6 758	1 770	101.24	6 511	220.11	5.72	1.22	110.16	126.10	47.50	43.27	30.06	34.65	2.17	0.20	5.09	3.66	11.52
4	11 558	27.98	40.19	7 096	1 778	131.52	6 595	268.30	7.31	1.02	142.99	89.38	43.62	48.87	23.57	26.06	1.12	0.18	5.49	6.07	11.64
5	11 413	19.58	42.65	7 611	1993	112.40	7 806	217.00	7.54	1.30	162.01	206.13	31.80	61.79	38.84	25.16	4.66	0.28	3.51	4.17	10.23
6	11 691	22.75	39.48	6 717	1 694	112.02	8 025	219.96	5.40	1.20	132.14	215.40	33.57	54.13	31.63	21.43	4.32	0.25	4.06	4.18	9.44
7	11 829	21.47	38.62	7 132	1 723	110.06	10 335	213.42	5.17	1.32	140.69	801.14	48.22	68.74	26.97	20.79	8.02	0.32	3.10	5.22	7.14
8	12 139	19.09	44.21	6 950	1 714	143.40	7 554	372.41	5.66	1.18	184.74	114.81	62.14	55.00	34.25	18.44	3.67	0.15	6.77	5.39	10.23
9	11 633	18.05	39.48	6 617	1 643	122.02	9 069	256.07	3.93	0.96	138.46	111.23	47.00	52.86	22.38	19.73	4.06	0.21	4.84	6.19	8.09
10	11 836	23.54	35.41	5 761	1 390	94.95	10 622	164.99	4.33	1.13	111.06	722.00	43.04	49.94	27.01	46.05	7.03	0.30	3.30	4.11	7.32
11	11 611	31.70	43.91	5 688	1 245	109.62	6 883	160.25	4.59	1.00	106.63	112.21	29.84	25.53	27.12	40.36	2.50	0.16	6.28	3.93	11.89
12	11 259	31.78	39.41	5 429	1 203	93.00	6 742	197.28	7.30	0.75	147.69	151.10	35.30	48.78	33.66	34.60	3.70	0.25	4.04	4.39	11.73
13	12 617	40.79	32.24	4 932	1 096	69.51	11 021	38.85	2.88	0.71	56.76	652.07	36.75	15.70	15.61	37.28	7.05	0.40	2.47	3.64	7.03
14	10 754	31.10	41.89	5 668	1 214	96.54	6 584	254.28	6.53	1.09	178.01	145.62	31.53	56.36	33.72	26.77	3.84	0.22	4.51	5.28	11.86
15	11 477	19.73	48.05	6 054	1 291	160.31	7 473	393.90	10.76	1.75	225.84	153.47	52.60	60.96	27.17	27.29	4.12	0.15	6.46	8.31	11.29
伟晶岩HLL322																					
1	12 155	35.42	38.45	5 074	1 139	102.32	8 546	169.27	6.94	0.88	115.39	440.95	36.83	41.49	33.12	23.14	5.57	0.25	4.08	3.48	9.06
2	11 590	16.41	47.79	5 587	1 013	145.63	7 570	345.79	7.91	1.20	162.65	118.90	55.17	64.02	32.78	21.67	3.93	0.19	5.40	4.96	10.68
3	12 653	28.14	59.41	6 276	1 276	166.86	7 894	410.57	14.34	2.02	417.02	122.06	86.03	77.99	23.26	22.11	2.82	0.19	5.26	17.93	10.87
4	11 754	23.41	48.35	5 474	1 109	153.31	7 738	392.44	7.57	1.55	209.02	121.95	69.41	73.01	34.13	24.03	3.45	0.19	5.38	6.12	10.55
5	12 266	18.54	49.56	5 862	1 152	143.48	8 192	344.67	6.49	1.68	188.11	181.64	39.03	63.72	43.27	22.73	4.16	0.18	5.41	4.35	10.52
6	12 239	22.76	46.77	5 499	991	120.58	8 073	286.19	4.17	1.12	150.95	176.02	54.42	55.06	30.53	19.65	4.18	0.19	5.20	4.94	10.53
7	12 117	23.10	51.31	5 884	1 065	126.11	7 398	291.10	7.59	1.51	220.36	109.34	28.15	62.92	45.60	18.24	3.07	0.22	4.63	4.83	11.97
8	11 417	27.83	51.68	5 950	1 036	159.58	7 645	352.52	4.96	1.22	176.11	122.59	39.44	67.77	41.87	18.05	4.28	0.19	5.20	4.21	11.55
9	12 406	25.19	42.68	5 971	928	100.38	7 603	209.02	5.16	0.93	140.64	92.39	31.64	47.76	63.45	15.04	3.17	0.23	4.38	2.22	11.83

续附表2

测试点	Li	Be	Sc	Mn	Zn	Ga	Rb	Nb	Cd	In	Sn	Cs	Ba	Ta	W	Tl	Pb	Ta/Nb	Nb/Ta	Sn/W	K/Rb
10	12 550	31.22	49.42	6 138	900	114.33	11 040	218.15	5.18	1.04	142.06	834.10	49.09	56.90	24.65	17.08	7.76	0.26	3.83	5.76	8.27
11	12 149	28.75	46.97	6 198	984	134.17	7 942	263.66	4.98	1.33	164.36	109.77	35.66	47.16	57.24	16.29	3.51	0.18	5.59	2.87	11.63
12	11 973	20.82	42.71	5 776	955	120.94	7 299	239.41	4.50	0.96	141.87	99.85	38.56	52.81	50.15	14.87	3.87	0.22	4.53	2.83	12.02
13	12 261	23.32	39.54	5 865	917	80.93	7 418	182.77	3.82	0.97	134.31	140.89	15.00	41.63	55.42	17.68	2.65	0.23	4.39	2.42	11.51
14	12 761	51.71	45.40	4 865	999	122.77	10 861	195.69	7.33	0.67	126.40	958.94	50.26	40.27	27.03	78.66	9.98	0.21	4.86	4.68	6.39
15	10 269	19.92	31.71	4 926	1862	92.08	6 885	125.42	5.54	1.34	87.87	86.66	28.02	41.12	48.47	71.39	3.44	0.33	3.05	1.81	9.31
16	12 868	22.96	40.50	4 993	1 738	120.82	8 222	211.54	2.22	0.88	75.16	150.95	53.48	59.09	23.38	68.23	2.88	0.28	3.58	3.21	8.52
17	12 521	28.50	40.97	5 120	1 679	104.90	10 900	258.72	7.42	0.94	134.20	630.45	54.70	75.83	28.01	59.70	7.41	0.29	3.41	4.79	6.42
18	12 392	40.75	41.55	5 635	2 142	94.32	10 466	104.53	5.11	0.81	74.54	696.90	48.89	42.68	12.42	45.23	8.75	0.41	2.45	6.00	6.95
19	12 542	39.82	43.21	5 639	2 188	103.77	10 783	139.70	5.17	0.89	117.57	802.78	49.01	48.04	23.46	34.33	7.94	0.34	2.91	5.01	6.82
云英岩化花岗岩HLL422																					
1	7 323	19.99	7.83	6 153	1 300	139.28	6 877	28.14	3.89	1.88	93.87	129.43	173.23	46.55	7.16	26.29	2.05	1.65	0.60	13.11	10.98
2	6 532	16.19	8.69	5 117	1 481	120.39	6 373	27.96	3.69	1.94	86.60	145.15	221.55	40.49	7.58	22.25	2.63	1.45	0.69	11.42	11.82
3	8 235	18.17	11.71	6 817	1 724	164.29	7 508	105.87	5.18	2.82	139.78	251.91	258.74	181.64	12.03	25.68	4.40	1.72	0.58	11.62	10.66
4	7 739	18.95	11.55	6 384	1 381	142.50	7 113	71.63	6.66	2.70	179.05	196.70	177.62	122.79	13.61	21.15	2.99	1.71	0.58	13.15	10.80
5	7 834	16.68	8.93	6 568	1 697	142.57	6 972	29.08	4.73	2.57	101.77	144.10	169.89	48.51	8.45	30.49	1.87	1.67	0.60	12.04	9.61
6	7 725	18.32	9.32	6 498	1 625	115.12	6 930	27.11	3.03	2.31	93.33	170.66	238.82	48.53	8.21	29.04	2.27	1.79	0.56	11.37	9.01
7	8 596	31.81	9.59	6 475	1 693	146.97	7 839	77.72	4.62	1.85	98.64	309.63	94.95	160.10	10.35	33.04	6.05	2.06	0.49	9.53	8.18
8	7 090	14.66	23.76	7 424	1 787	117.47	7 674	99.82	9.17	3.56	237.43	227.04	300.75	222.35	21.60	27.06	4.70	2.23	0.45	10.99	8.29
9	6 816	17.28	12.10	7 494	2 073	152.74	6 597	68.05	8.50	3.45	198.15	185.23	205.92	109.07	18.28	25.25	3.47	1.60	0.62	10.84	9.93
10	7 107	24.61	12.24	7 051	1 346	115.60	6 792	23.94	-	2.21	80.52	194.24	156.31	37.69	7.64	21.91	2.59	1.57	0.64	10.55	9.10
11	7 473	19.49	10.84	7 433	1 456	122.59	7 003	27.05	3.12	2.44	95.12	180.11	186.76	42.13	6.57	22.76	2.41	1.56	0.64	14.47	9.20
12	7 455	20.07	12.17	7 162	1 332	117.29	6 905	24.45	4.45	2.48	83.49	197.83	187.58	37.49	7.43	21.18	3.01	1.53	0.65	11.24	9.18
13	5 379	29.91	12.34	5 263	926	136.99	6 884	39.90	5.60	1.86	162.66	265.36	182.79	66.06	8.69	22.84	3.00	1.66	0.60	18.72	9.35