

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

徐喆^{1,2)}, 张勇^{*1,5)}, 潘家永¹⁾, 张芳荣²⁾, 楼法生³⁾, 彭琳琳⁴⁾, 周渝²⁾, 贺彬²⁾

- 1) 核资源与环境国家重点实验室, 东华理工大学, 江西南昌, 330013;
2) 江西省地质调查勘查院基础地质调查所, 江西南昌, 330030;
3) 江西省地质调查勘查院, 江西南昌, 330009; 4) 江西省地质局, 江西南昌, 330036;
5) 东华理工大学地质调查研究院, 江西南昌, 330013

内容提要:稀有金属矿产是江西省优势矿产资源,成矿类型以花岗岩型为主,主要分布于赣西和赣北地区,以宜春 414 超大型钽铌矿为代表,而花岗岩广泛分布的赣南地区鲜有关于燕山期花岗岩型稀有金属矿床的报道。本文以赣南石城海罗岭铌钽矿床为研究重点,结合详细的野外调查,开展花岗岩的岩石学、岩石地球化学和同位素年代学等研究,厘定了海罗岭的中粒斑状黑云母二长花岗岩-中细粒黑云母二长花岗岩岩石组合,明确了钠长石化叠加白云母化的中粒斑状黑云母二长花岗岩与钽铌矿密切相关的成矿专属性。海罗岭的成矿作用具两阶段特征,早阶段以蚀变花岗岩型钽铌矿为主,赋存于钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩中,晚阶段则以花岗伟晶岩型锂矿为主,赋存于云母锂辉石伟晶岩中。海罗岭的花岗岩主要经历了钠长石化、白云母化、黄玉化、绢云母化、硅化等蚀变作用,呈现碱性长石化→云英岩化的演化过程。海罗岭花岗岩具富硅、富碱、富铝,贫钛、镁的特征,其中钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩(富钽花岗岩)中 F 含量为 $8330 \times 10^{-6} \sim 13076 \times 10^{-6}$, 平均为 10475×10^{-6} , 具极低的 Nb/Ta 值(0.34~0.49)、Zr/Hf 值(3.73~4.19)、稀土总量低(ΣREE 为 $16.3 \times 10^{-6} \sim 23.2 \times 10^{-6}$)和“四分组”效应等特征,显示其成矿经历了岩浆-流体相互作用的过程。研究显示, Li 矿化富集程度与 F 含量呈明显的正相关,与稀土总量、K/Rb 值呈负相关; Ta 矿化富集程度与 F 含量呈明显的正相关,与 Nb/Ta 值、Zr/Hf 值呈明显的负相关。中细粒黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 141.9 ± 1.1 Ma, 云母锂辉石伟晶岩和碱性长石伟晶岩独居石 U-Pb 年龄分别为 141.68 ± 0.69 Ma 和 137.62 ± 0.73 Ma, 均归属于早白垩世。研究表明, 赣南地区 140 Ma 左右可能存在一次与钠长石化叠加白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩相关的独特的钽铌矿成矿事件和与花岗伟晶岩相关的锂成矿事件。这一发现打破了以往华南稀有金属主要赋存于燕山期复式岩体晚期二云母花岗岩-白云母花岗岩中的认识,拓宽了找矿思路,为赣南乃至华南地区稀有金属找矿提供了新的方向。

关键词:稀有金属; 钽铌锂; 地球化学; 同位素年龄; 石城海罗岭, 赣南

锂(Li)、铍(Be)、铌(Nb)、钽(Ta)、锆(Zr)、铪(Hf)等稀有金属是重要的战略性关键矿产,其中锂是 21 世纪的能源金属(李建康等, 2014, 2019; 许志琴等, 2018; 王登红, 2019; 王汝成等, 2020; 侯增谦等, 2020)。江西稀有金属成矿类型以花岗岩型为主,伟晶岩型次之。花岗岩型稀有金属矿床主要分布于江西北部,代表性矿床有宜春雅山 414、横峰松

树岗,均显示与高分异演化的花岗岩密切相关(李洁和黄小龙, 2013; 杨泽黎等, 2014; Zhu et al., 2015),形成时代主要为燕山期,目前人们对赣北这些稀有金属矿床进行了大量研究,并取得了一批丰硕的科研成果(Yin et al., 1995; Huang et al., 2002; 李洁和黄小龙, 2013; 杨泽黎等, 2014; 李胜虎, 2015; Zhu et al., 2015; Wang et al., 2018; Che et al., 2019; 张

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 42062006、41962007)、江西省地质局科技研究项目(编号 2022JXDZKJKY02)、江西省地质局青年科学技术带头人培养计划项目(编号 2022JXDZKJRC04)和江西省地质调查勘查院基础地质调查所科研项目(编号赣地矿地调[2020]06)共同资助的成果。

收稿日期:2022-05-22; 改回日期:2022-09-05; 网络发表日期:2023-05-30; 责任编辑:毕献武; 责任编辑:周健。

作者简介:徐喆,男,1985 年生。高级工程师,主要从事区域矿产地质调查、矿产勘查及相关科研工作。E-mail: 303543918@qq.com。

* 通讯作者:张勇,男,1983 年生。博士,副教授,地质学专业。E-mail: zhyzy2004@163.com。

引用本文: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钽铌矿床岩石地球化学、年代学特征及其地质意义. 地质学报, 97(6): 1874~1899, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023237.
Xu Zhe, Zhang Yong, Pan Jiayong, Zhang Fangrong, Lou Fasheng, Peng Linlin, Zhou Yu, He Bin. 2023. Petrogeochemical and geochronological characteristics of Hailuoling granite-type niobium-tantalum deposit in Shicheng, Jiangxi Province and its geological significance. Acta Geologica Sinica, 97(6): 1874~1899.

勇等,2019),但对赣南地区花岗岩的稀有金属成矿作用关注甚少。

赣南铌钽锂等稀有金属成矿类型主要为伟晶岩型和花岗岩型,前者以宁都河源和广昌西港锂辉石矿为代表,锂成矿时代主要为加里东期(Che et al., 2019);后者以石城海罗岭和姜坑里铌钽矿为代表,海罗岭矿区中粒斑状黑云母二长花岗岩成岩时代为 127.7 Ma(全岩 Rb-Sr)(中国矿产地志·江西卷编委会,2015),姜坑里矿区花岗岩和似伟晶岩同位素年龄分别为 140.6 Ma(Rb-Sr 等时线)和 150 Ma(K-Ar 法)^①。由于 Rb-Sr 和 K-Ar 同位素系统存在封闭温度低、体系容易受后期地质事件扰动等问题(Dickin and Muller, 2005),其年龄偏新,因此需要新的同位素分析测试方法对其进行精确厘定。同时前人也未对海罗岭花岗岩的蚀变岩石学、岩石地球化学开展系统研究。因此,本文选取石城海罗岭铌钽矿床为研究对象,开展花岗岩岩石学、岩石地球化学和同位素年代学等研究,进行重点解剖,以期为赣南地区花岗岩型稀有金属找矿勘查提供岩石地球化

学 and 同位素年代学依据。

1 区域地质背景

石城海罗岭铌钽矿床地处赣南的宁都—石城地区,位于武夷山隆起带西坡永平-寻乌北北东向断裂带上(图 1),属武夷山成矿带浙中-武夷山(隆起)W-Sn-Mo-Au-Ag-Pb-Zn-Nb-Ta-(叶腊石)萤石成矿带(徐志刚等,2008)。区域上出露地层主要有青白口系周潭岩组、南华系万源岩组、南华系—震旦系洪山组、寒武系外管坑组和白垩系茅店组。周潭岩组岩性主要为片麻岩、斜长角闪岩等;万源岩组岩性主要为变粒岩等;洪山组岩性主要为冰碛砾岩、石墨石英片岩等;外管坑组主要岩性为硅质岩、碳质板岩;茅店组主要岩性为红色砂岩、砂砾岩等。区域内断裂发育,主要有北东向、北北东向、北西向和近东西向,各组断裂耦合共同控制着区域内岩浆岩的侵位、白垩纪盆地的展布和稀有金属矿床(点)的分布(图 2)。

该区岩浆活动强烈,分布广泛,有加里东期和燕

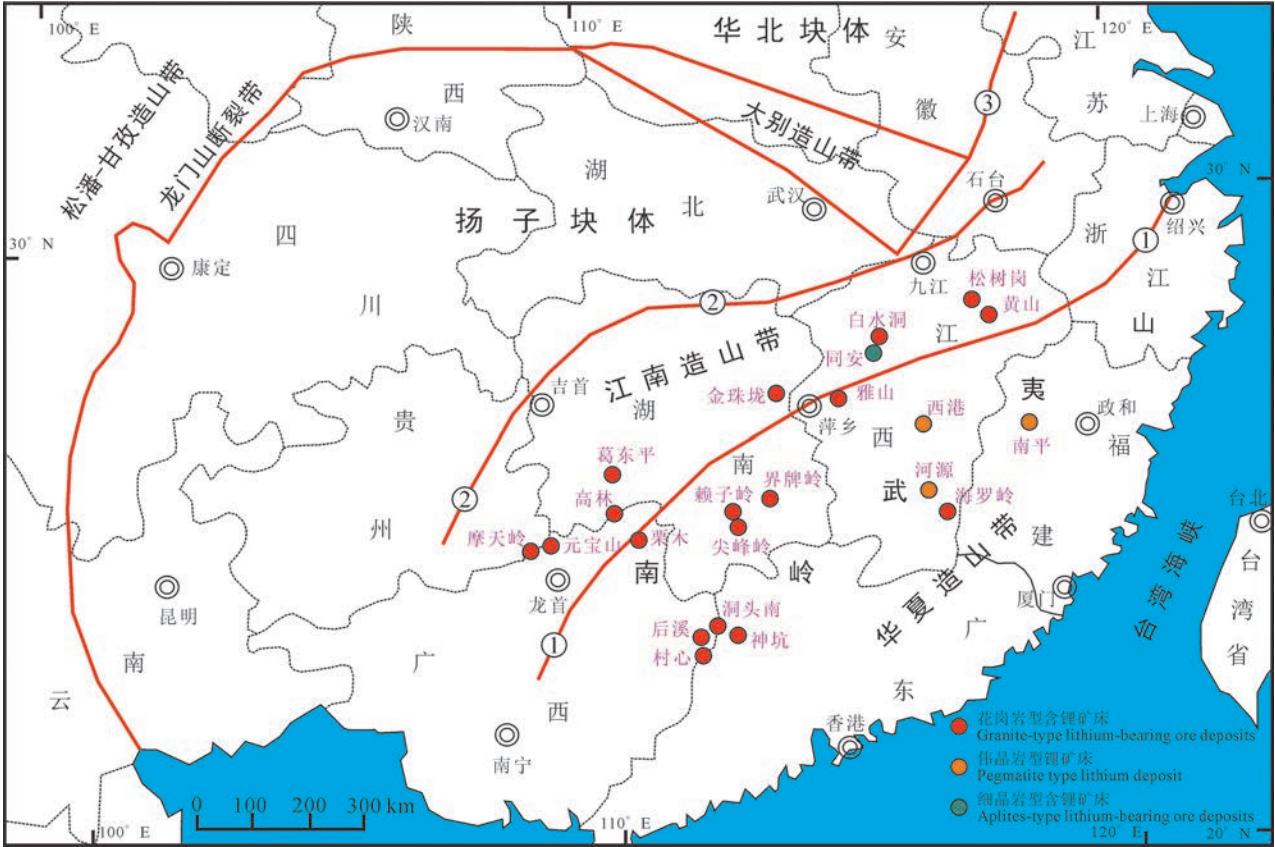


图 1 海罗岭矿床大地构造位置图(据舒良树等,2021,略加修改)

Fig. 1 Tectonic location map of the Hailuoling deposit (modified after Shu Liangshu et al., 2021)

①—绍兴-萍乡-龙胜断裂带;②—石台-九江-吉首隐伏断裂带;③—郯庐断裂带

①—Shaoxing-Pingxiang-Longsheng fault zone; ②—Shitai-Jiujiang-Jishou buried fault zone; ③—Tan-Lu fault zone

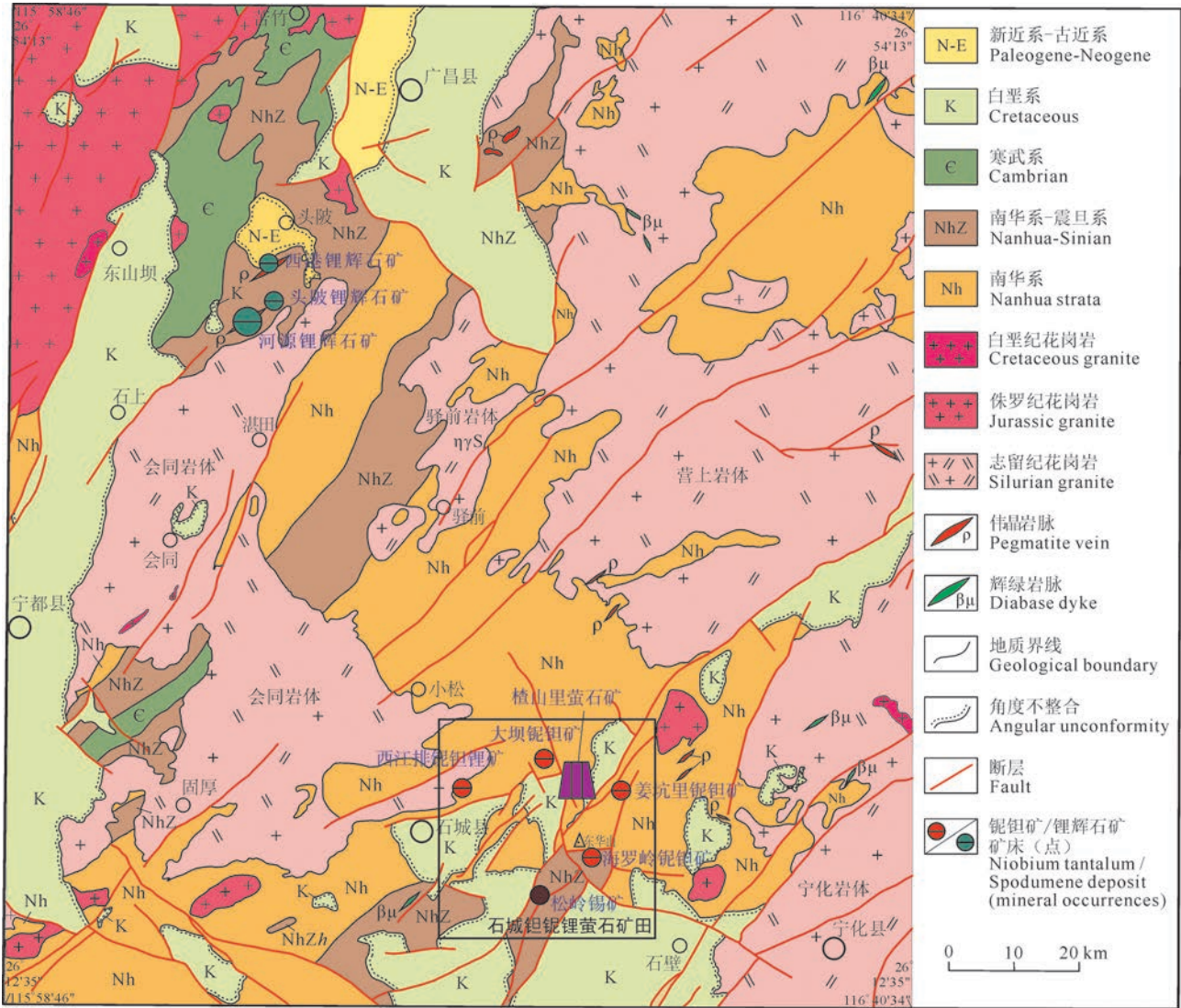


图 2 石城地区稀有金属矿产地质简图

Fig. 2 Geological sketch showing rare metal deposits in Shicheng area

山期花岗岩。加里东期花岗岩岩性为斑状黑云母二长花岗岩，呈岩基状产出(如会同、营上、驿前岩体)，其成岩年龄为 425.8 ± 6.2 Ma(崔圆圆等, 2013)，属晚志留世。围绕会同岩体外围分布有宁都河源、广昌头陂、西港等锂辉石矿床，其成矿年龄为 $424 \sim 420$ Ma(铌钽铁矿 U-Pb)，归属于晚志留世(Che et al., 2019)，与成岩时代基本一致。燕山期花岗岩分为侏罗纪和白垩纪两期，其中侏罗纪花岗岩岩性为二长花岗岩和花岗闪长岩等，呈岩株状产出；白垩纪花岗岩岩性为中粒斑状黑云母二长花岗岩和中细粒黑云母二长花岗岩，呈小岩株、岩瘤状产出，燕山期花岗岩主要分布于海罗岭、姜坑里等地。此外，区域内还见有岩脉侵入，如花岗斑岩脉、伟晶岩脉、花岗岩脉、石英脉、闪长(玢)岩脉和辉绿岩脉等。

石城海罗岭铌钽矿床与姜坑里铌钽矿、西江排

铌钽锂矿、大坝铌钽矿、松岭锡矿和楂山里萤石矿等矿床(点)共同构成了石城铌钽锂萤石矿田(图 2)，主要矿化类型为蚀变花岗岩型铌钽矿和斑岩型、隐爆角砾岩型锡矿(胡论元等, 2015)。海罗岭铌钽矿床除钽、铌外，伴生有锂、铷、锆(钪)等多种稀有金属。此外，矿田内伟晶岩脉与稀有金属矿化密切相关，常成组成群出露，组成区内一系列稀有金属矿床(点)，如西江排铌钽锂矿、大坝铌钽矿等。

2 矿床地质特征

2.1 矿区概况

海罗岭铌钽矿区出露地层为南华系下统万源岩组(图 3)，为一套浅灰色、灰黑色巨厚层状变质长石英砂岩、变粒岩、黑云母长英质角岩等，具硅化和角岩化。断裂主要有东西向、北东向和北西向，其中

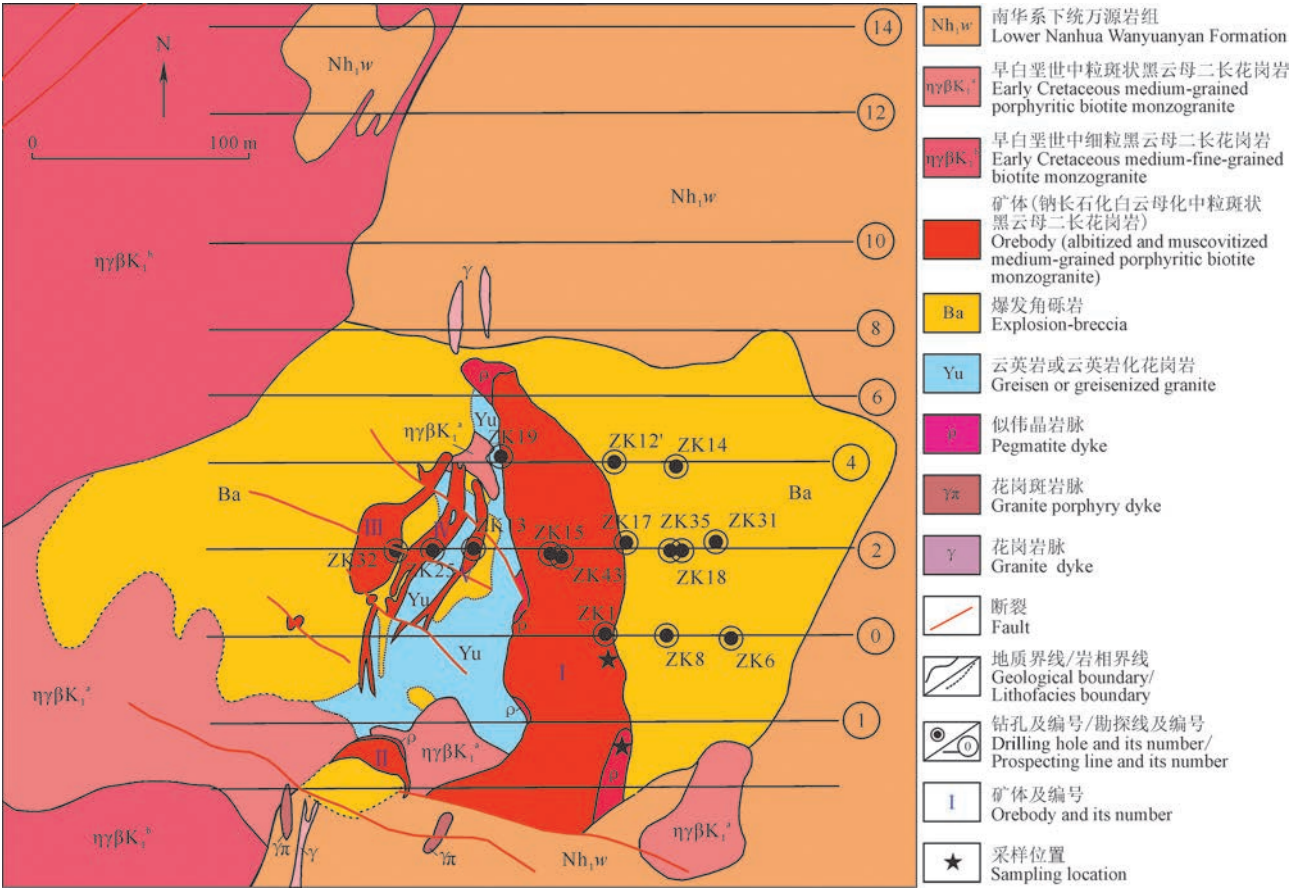


图 3 海罗岭矿床地质简图(据温珍连等,2008 修改^①)
Fig. 3 Geological sketch of the Hailuoling deposit (modified after Wen Zhenlian et al. ,2008)

东西向挤压断裂带与北东向断裂控制着花岗岩体、钨钼矿体及各类岩脉的分布,北西向硅化破碎带为成矿后断裂,切割花岗岩体及矿体。

矿区内岩浆岩主要为中粒斑状黑云母二长花岗岩和中细粒黑云母二长花岗岩(图 3、图 4a)、似伟晶岩(图 4b、c、f)及钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩(图 4d)等。中粒斑状黑云母二长花岗岩($\eta\gamma\beta K_1^a$)分布于矿区中心,与爆发角砾岩共生,呈岩瘤状产出(图 3),东西剖面上呈漏斗状,南北剖面上呈向北倾斜的筒状,局部见边缘相为中细粒斑状黑云母二长花岗岩。强烈钠长石化叠加白云母化中粒斑状花岗岩形成了钨钼矿体。

该区中细粒黑云母二长花岗岩($\eta\gamma\beta K_1^b$) (图 4e)主要出露在矿区西侧,呈岩株状,在中粒斑状黑云母二长花岗岩内部偶见有几米宽的中细粒黑云母花岗岩岩脉侵入(图 4g、h)。经深部钻孔证实向北倾伏,中粒斑状黑云母二长花岗岩仅赋存于 415 m 标高以上,其底部被中细粒黑云母二长花岗岩侵入截断。似伟晶岩主要分布于钠长石化白云母化中粒

斑状黑云母二长花岗岩(钨钼矿体)边部(图 3、图 4a),由边部到中心,大致可为云母石英伟晶岩(图 4b)、云母锂辉石伟晶岩(4c)和碱性长石伟晶岩(图 4f)。

爆发角砾岩分布于中粒斑状黑云母二长花岗岩的顶部与变质岩的接触带(图 3),东西长 450 m,南北宽 200 m。平面上呈似椭圆形,剖面上呈似漏斗状。角砾成分为变质长石石英砂岩和中粒斑状黑云母二长花岗岩,外形棱角状,大小不一,一般 20~40 cm,大者 1~2 m,小者几毫米,随着深度的增加,角砾变小,其与变质长石石英砂岩无明显界线。此外,矿区内以花岗斑岩脉出露最多,其次有花岗岩脉、石英闪长岩脉、角闪煌斑岩脉和石英脉等。

2.2 矿床地质

2.2.1 矿体特征

矿区内主要矿体有 11 条,地表出露 5 条(编号为 I~V 号),盲矿体有 6 条(图 3、图 5),产于爆发角砾岩与中粒斑状黑云母二长花岗岩的内外接触带,局部与变质岩接触,形态以脉状为主,部分为透

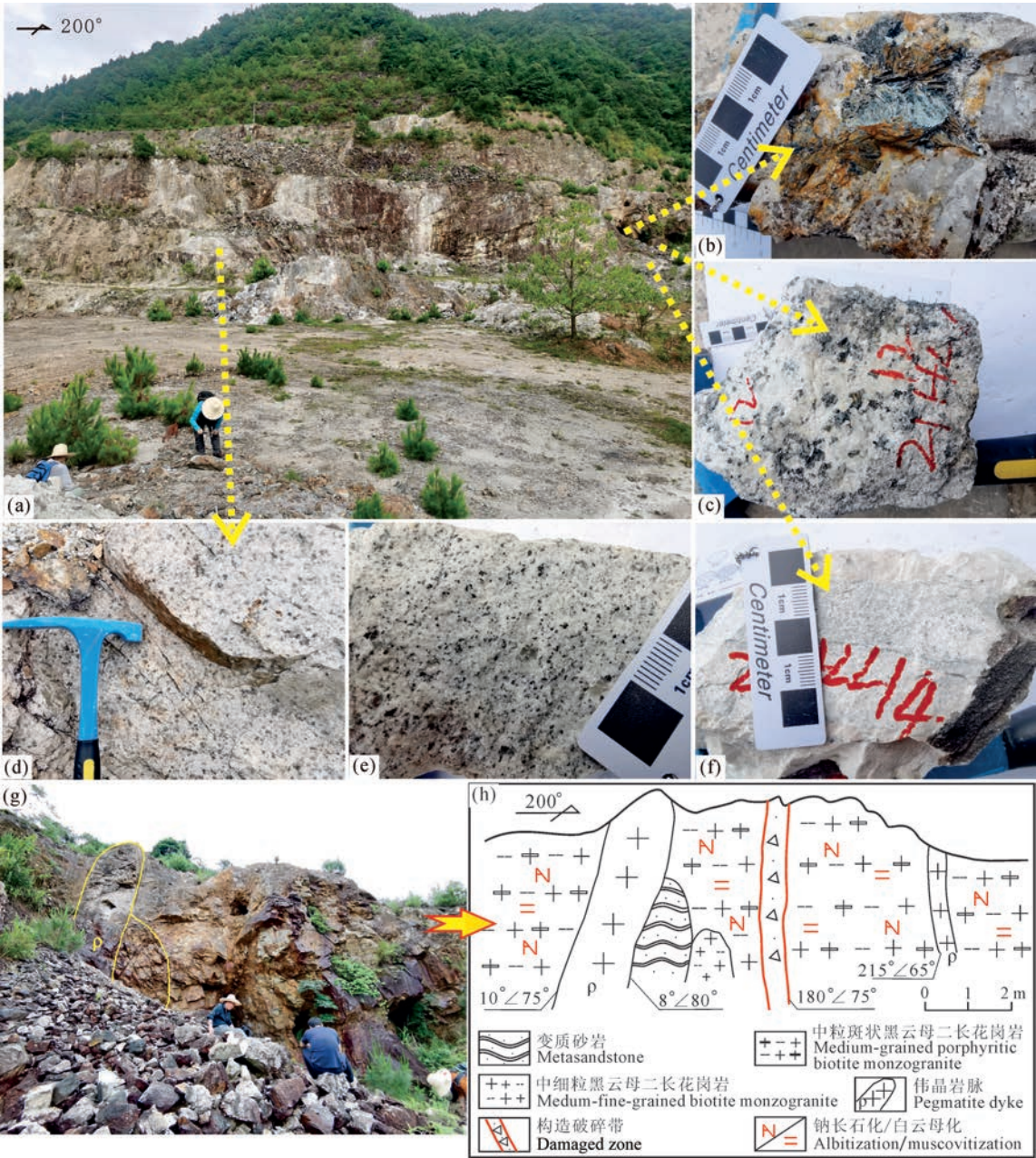


图 4 海罗岭矿区野外地质特征

Fig. 4 Field geological characteristics of the Hailuoling mining area

(a)—海罗岭矿区采场;(b)—云母石英伟晶岩;(c)—云母锂辉石伟晶岩;(d)—钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩;(e)—中细粒黑云母二长花岗岩;(f)—碱性长石伟晶岩;(g)—似伟晶岩脉和中细粒黑云母二长花岗岩侵入到钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩中;(h)—似伟晶岩脉和中细粒黑云母二长花岗岩侵入到钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩中素描示意图

(a)—the stope of the Hailuoling mining area; (b)—mica quartz pegmatite; (c)—mica spodumene pegmatite; (d)—albitized and muscovitized medium-grained porphyritic biotite monzogranite; (e)—medium-fine-grained biotite monzogranite; (f)—alkaline feldspar pegmatite; (g)—pegmatite dykes and medium-fine biotite monzogranite intruded into the albitized and muscovitized medium-grained porphyritic biotite monzogranite; (h)—sketch of pegmatite dykes and medium-fine biotite monzogranite intruded into albitized and muscovitized medium-grained porphyritic biotite monzogranite

镜状、瘤状,矿体在剖面上呈侧列分布(图 5),沿倾向延深较短。I 号矿体规模最大,呈近南北走向,主体倾向北东东—南东东,0 线以南倾向西,倾角介于 53°~65°,长 330 m,厚度一般 4~34 m,最大可达 60

m;平均品位:Nb₂O₅ 0.0129%,Ta₂O₅ 0.0184%,储量占全区总储量的 55%。海罗岭矿床成矿元素以 Ta、Nb 为主,伴生有 Li、Rb、Zr、Hf 等稀有金属元素,矿体稀有元素平均含量见表 1。全区平均品位

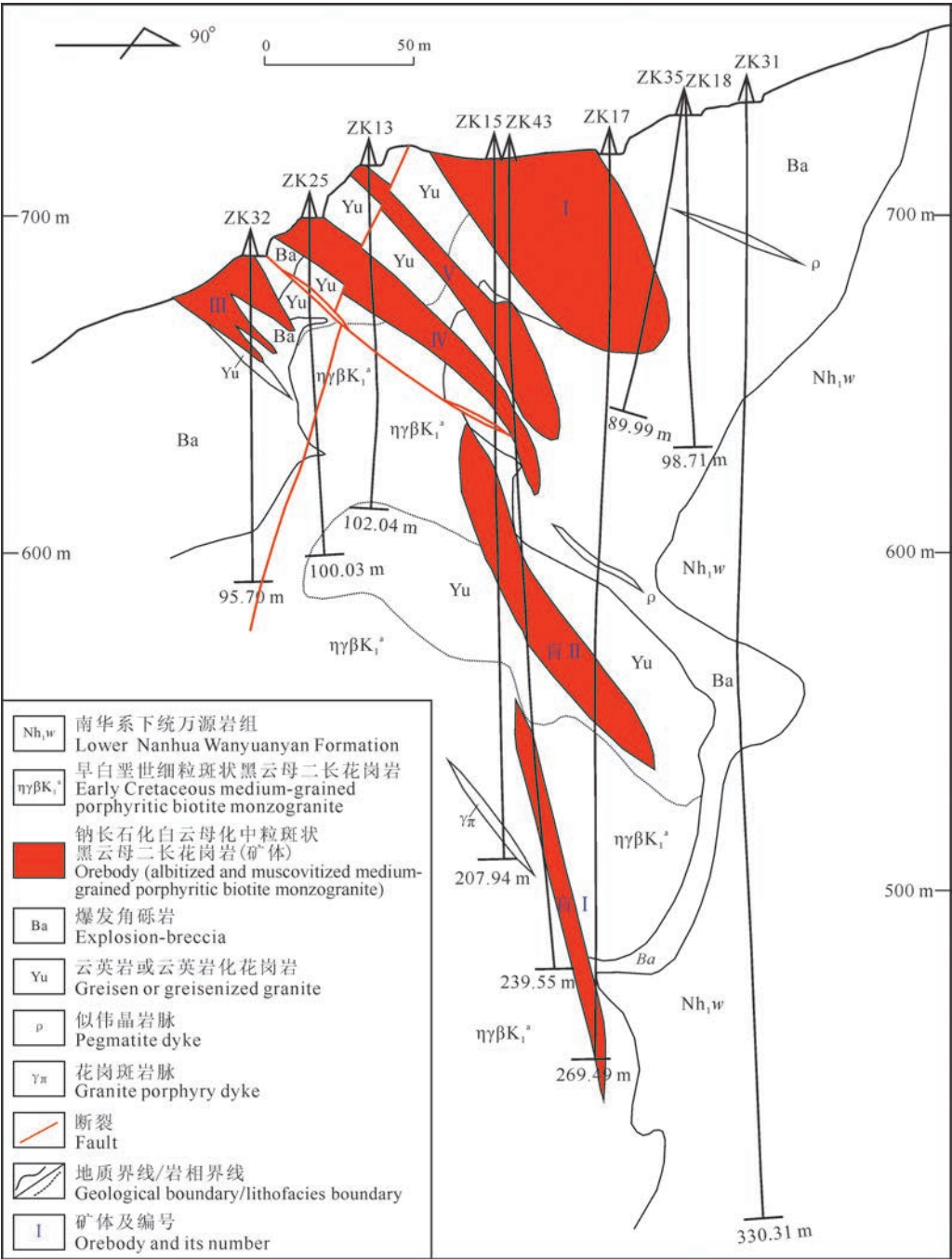


图 5 海罗岭矿床②号勘探线剖面图(据温珍连等,2008 修改^②)(②号勘探线位置见图 3)

Fig. 5 Section of No. 2 exploration line of the Hailuoling deposit (modified after Wen Zhenlian et al. ,2008^②) (the location of No. 2 exploration line is shown in Fig. 3)

为 Nb_2O_5 0.0119%, Ta_2O_5 0.0170%, Li_2O 含量为 0.1156%, Rb_2O 含量为 0.1521%, $(\text{Zr} + \text{Hf})_2\text{O}$ 含量为 0.0076%。

笔者在野外调查过程中对云母锂辉石伟晶岩进行了拣块取样分析, Nb_2O_5 含量为 0.0439%, Ta_2O_5 含量为 0.0161%, Li_2O 含量为 0.72%, Rb_2O 含量为 0.38%, Nb、Ta、Rb 均达工业品位以上, Li 接近工业品位, 指示在海罗岭矿区存在蚀变

花岗岩型和花岗伟晶岩型两种稀有金属矿化类型, 这一特征与广昌西港—宁都河源一带单一的花岗伟晶岩型锂辉石矿(胡为正等, 2005, 2006; Che et al. , 2019)明显不同, 显示在石城地区具有花岗伟晶岩型锂矿找矿潜力。

2.2.2 矿石特征

矿石类型为蚀变花岗岩型和花岗伟晶岩型, 前者为似斑状结构, 基质具中粒花岗结构, 块状构造;

后者主要为细粒伟晶结构、中粒伟晶结构,条带状构造、块状构造。矿石矿物主要有铌钽铁矿、锰钽铁矿、细晶石、铁锂云母、锂云母、锂辉石、变种锆石等(胡论元等,2015),还有微量的铌铁矿、钽铁矿、铌铁金红石、黑钨矿、锡石、辉铋矿和辉钼矿等。脉石矿物主要为石英、钠长石、钾长石、黑鳞云母、黄玉、萤石、绢云母、石榴子石、电气石、绿泥石和高岭土等。

表 1 海罗岭矿区矿体稀有元素平均含量(%)

统计表(据温珍连等,2008^①)

Table1 Statistical table of average content (%) of rare elements in ore bodies in the Hailuoling mining area

(after Wen Zhenlian et al. ,2008^②)

矿体编号	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	Li ₂ O	Rb ₂ O	(Zr+Hf) ₂ O
I 号	0. 0134	0. 0166	0. 1493	0. 1624	0. 0073
II 号	0. 0127	0. 0176	0. 0772	0. 1283	0. 0076
III 号	0. 0130	0. 0200	0. 2643	0. 1930	0. 0097
IV 号	0. 0122	0. 0149	0. 1796	0. 1663	0. 0087
V 号	0. 0119	0. 0181	0. 4025	0. 2043	0. 0093
盲 I 号	0. 0097	0. 0154	0. 0545	0. 1361	0. 0080
盲 II 号	0. 0104	0. 0166	0. 1151	0. 1489	0. 0072
全区	0. 0119	0. 0170	0. 1156	0. 1521	0. 0076

2.2.3 蚀变特征

矿区内花岗岩蚀变强烈,在空间上,表现出一定的分带特征,垂向上,自上而下,蚀变由强变弱,平面上,自矿区中心由内往外蚀变由强减弱。蚀变类型主要为早期的钠长石化、白云母化、黄玉化,晚期的绢云母化、硅化、高岭土化、绿泥石化等。

早期蚀变表现为钠长石常交代石英和钾长石:微细板条状钠长石呈多层环状交代粗大的石英晶体(图 6a),推测为热液沿石英生长环带溶蚀交代形成钠长石环带,图 6a 中可见交代形成的钠长石环带贯穿石英斑晶;另外自形一半自形板状钠长石常沿钾长石边缘交代(图 6b),局部见板条状钠长石在钾长石和石英的交界处同时对两种矿物进行交代。黄玉化常伴随钠长石化出现:他形粒状的黄玉沿石英边缘交代,或沿长石解理缝及其边缘交代(图 6c、d),黄玉粒径为 0. 05~0. 3 mm。白云母化强烈:常见黑云母褪色发生浅色云母化形成白云母(图 6e、f),局部见白云母交代钾长石和钠长石(图 6f、g)。

晚期蚀变表现为绢云母化与硅化较为普遍:长石类矿物常发生绢云母化并伴随硅化,图 6h 见绢云母、石英充填于切穿钠长石的晚期裂隙中,局部见绢云母沿黄玉颗粒及边缘交代。另外还见有钾长石的高岭土化及黑云母的绿泥石化。对比分析发现,铌钽矿化与钠长石化、白云母化强度呈正相关关系,即

钠长石化、白云母化越强,铌钽含量越高。

3 样品采集与分析方法

本次研究主要采集了海罗岭铌钽矿区采场中地表出露的钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩(矿体)(样品编号为 21HLL19、21HLL20、21HLL21)、中细粒黑云母二长花岗岩(样品编号为 21HLL03、21HLL04、21HLL05)、硅化中细粒黑云母二长花岗岩(样品编号为 21HLL07、21HLL08、21HLL09、21HLL10)和云母石英伟晶岩(样品编号为 21HLL11)、云母锂辉石伟晶岩(样品编号为 21HLL12)、碱性长石伟晶岩(样品编号为 21HLL15)等,采样位置见图 3。

钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩呈灰白色,似斑状结构(图 7a),块状构造,斑晶由钾长石(5%)和石英(8%)组成(图 7b);基质具中粒花岗岩结构,主要为斜长石(33%)、钾长石(29%)、石英(20%)、黑云母(3%)及微量锆石。岩石钠长石化、白云母化、绢云母化(图 7b、c)普遍,见有稀有金属花岗岩中典型的“雪球结构”(图 7c),即石英斑晶中分布有短柱状或粒状钠长石,呈环状,似滚动的雪球,这一特征在赣南地区稀有金属花岗岩中尚属首次发现。

中细粒黑云母二长花岗岩呈灰白色,中细粒花岗岩结构(图 7d),块状构造,矿物成分主要为钾长石(36%)、斜长石(32%)、石英(28%)、黑云母(4%)(图 7e)等及微量磷灰石,局部可见较强的硅化(图 7f)、钠长石化,具弱高岭土化,可见微量萤石。

似伟晶岩呈脉状或透镜状产出,表现出一定的分带特征,由内而外,大致可分为碱性长石伟晶岩、云母锂辉石伟晶岩和云母石英伟晶岩。云母锂辉石伟晶岩(图 7g)呈灰白色,具细粒伟晶结构,块状构造,矿物组成主要为云母(25%)(图 7h)、锂辉石(61%)(图 7i)、石英(8%)、长石(5%)及少量褐帘石(1%)(图 7i),硅化较强,局部见高岭土化。

对上述花岗岩选择典型岩矿石样品进行了全岩主量、微量和稀土元素测定,对中细粒黑云母二长花岗岩(样品 21HLL10)进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年,对云母锂辉石伟晶岩(样品 21HLL12)、碱性长石伟晶岩(样品 21HLL15)进行了 LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 同位素测年。

3.1 主量、微量及稀土元素分析

全岩主量、微量及稀土元素分析在自然资源部南昌矿产资源检测中心完成。主量元素主要采用

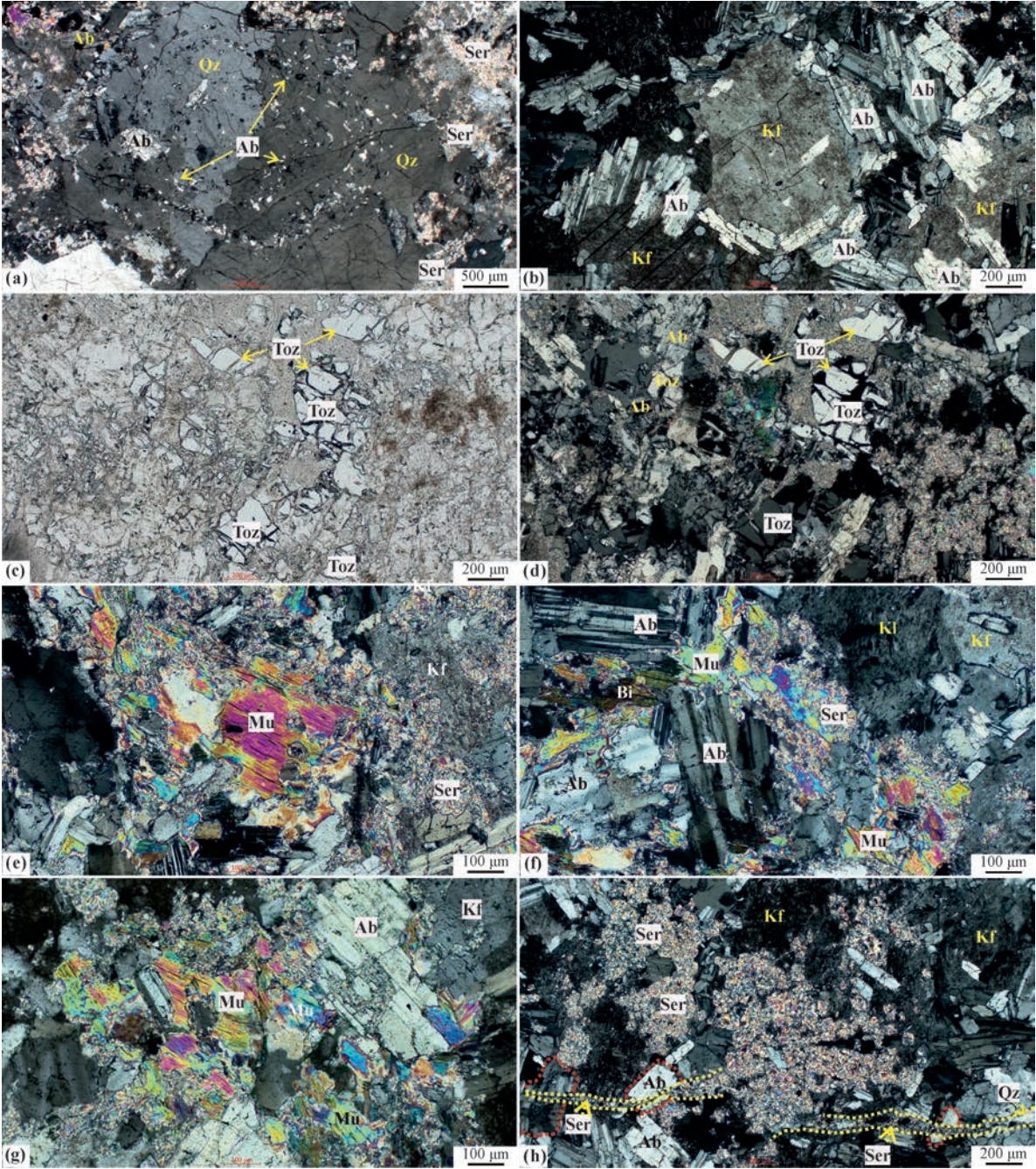


图 6 海罗岭矿区富钽花岗岩蚀变特征

Fig. 6 Granite alteration characteristics in the Hailaoling mining area

(a) 一粒状钠长石贯穿石英斑晶构成多层环带构造,正交偏光;(b) 钠长石呈自形、半自形短柱状或板状围绕钾长石分布,正交偏光;(c) 黄玉交代石英和钠长石,单偏光;(d) 黄玉交代石英和钠长石,正交偏光;(e) 黑云母褪色蚀变成白云母,岩石中绢云母化较强,正交偏光;(f) 黑云母褪色蚀变成白云母,白云母、绢云母交代钾长石、钠长石,钾长石发育高岭土化,正交偏光;(g) 一蚀变形成的白云母交代钾长石、钠长石,正交偏光;(h) 一绢云母化、硅化发育于切穿钠长石裂隙中,正交偏光;Ab—钠长石;Bi—黑云母;Kf—钾长石;Mu—白云母;Qz—石英;Ser—绢云母;Kl—高岭石;Toz—黄玉

(a)—granular albite through quartz phenocryst to form a multilayer ring structure; (b)—albite is euhedral, semi-euhedral short column or plate, around potassium feldspar; (c)—topaz metasomatic quartz and albite; (d)—topaz metasomatic quartz and albite; (e)—biotite is faded and corroded into muscovite, and sericitization is developed in rocks; (f)—biotite faded into muscovite, muscovite and sericite metasomatized potassium feldspar and albite, potassium feldspar developed kaolinization; (g)—altered muscovite metasomatic potash feldspar and albite; (h)—sericitization and silicification develop in fractures that cut through albite; Ab—albite; Bi—biotite; Kf—potassium feldspar; Mu—muscovite; Qz—quartz; Ser—sericite; Kl—kaolinite; Toz—topaz

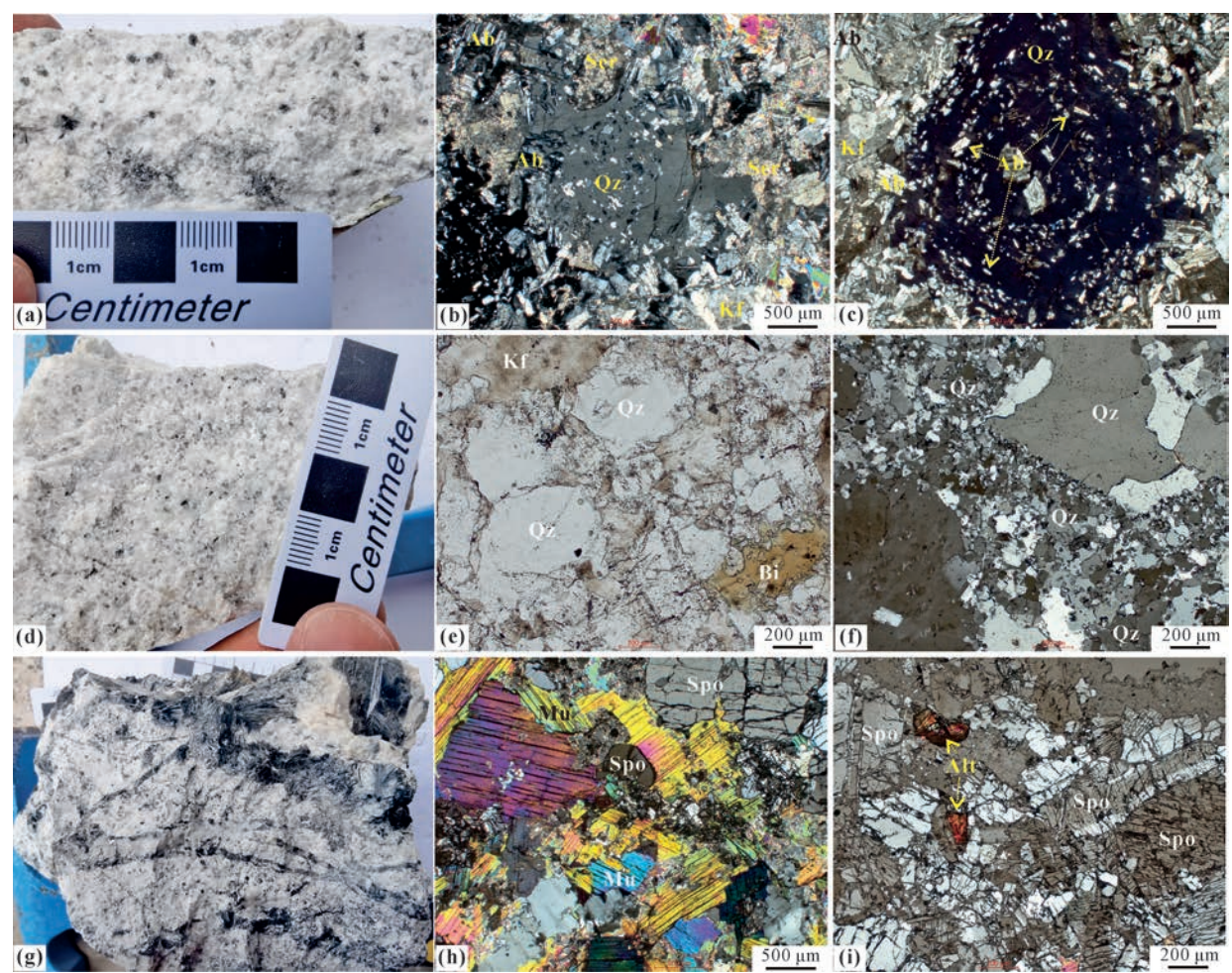


图 7 海罗岭矿区典型岩矿石特征

Fig. 7 Petrographic characteristics of typical rocks and ores in the Hailuoling mining area

(a) — 钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩 (样品 21HLL19); (b) — 钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩中石英斑晶中包裹有钠长石, 基质发育绢云母化, 正交偏光; (c) — 钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩中发育的“雪球结构”, 石英斑晶中包裹的短柱状或粒状钠长石呈环状分布, 正交偏光; (d) — 中细粒黑云母二长花岗岩 (样品 21HLL03); (e) — 中细粒黑云母二长花岗岩中石英、黑云母、钾长石特征, 单偏光; (f) — 硅化中细粒黑云母二长花岗岩镜下特征, 正交偏光 (样品 21HLL07); (g) — 云母锂辉石伟晶岩 (样品 21HLL12); (h) — 云母锂辉石伟晶岩中云母、锂辉石镜下特征, 正交偏光; (i) — 云母锂辉石伟晶岩中锂辉石发育, 见少量褐帘石, 正交偏光; Ab — 钠长石; Bi — 黑云母; Kf — 钾长石; Mu — 白云母; Qz — 石英; Spo — 锂辉石; Alt — 褐帘石; Ser — 绢云母

(a) — albitized and muscovitized fine-grained porphyritic biotite monzogranite (sample 21HLL19); (b) — albites in the quartz phenocryst and sericite is developed in matrix of albitized and muscovitized fine-grained porphyritic biotite monzogranite; (c) — the “snowball structure” developed in the albitized and muscovitized fine-grained porphyritic biotite monzogranite, and the short columnar or granular albites enclosed in quartz phenocrysts are distributed in circular; (d) — medium-fine biotite monzogranite (sample 21HLL03); (e) — quartz, biotite and potash feldspar in medium-fine biotite monzogranite; (f) — characteristic of silicified medium-grained biotite monzonite under microscope (sample 21HLL07); (g) — mica spodumene pegmatite (sample 21HLL12); (h) — characteristic of mica and spodumene in mica spodumene pegmatite; (i) — spodumene and a small amount of allanite is developed in mica spodumene pegmatite; Ab — albite; Bi — biotite; Kf — potassium feldspar; Mu — muscovite; Qz — quartz; Spo — spodumene; Alt — allanite; Ser — sericite

无水四硼酸锂熔融, 与样品混匀后在 1150 ~ 1250℃ 熔融成玻璃熔片, 采用飞利浦帕纳科 PANalytical Axios X 荧光光谱仪进行测定, X 光管电压 50 kV, 电流 50 mA, 采用康普顿射线为内标校正基体效应。各元素含量测量范围: 0.002% ~ 99%。微量及稀土元素采用电感耦合等离子体质

谱法测定, 样品前处理方式主要采用封闭溶矿, 采用氢氟酸、硫酸、王水等处理, 检测仪器为美国热电公司 Q-MS 型质谱仪, 仪器主要性能 ($\text{Li}(7) \leq 3\% \text{RSD}$, $\text{Y}(89) \leq 3\% \text{RSD}$, $\text{Tl} \leq 3\% \text{RSD}$), 能在 5 ~ 250 荷质比范围内进行扫描, 仪器检测条件为跳峰, 发射功率 1250W, 采用内标法进行校正。上述检测方法

具有试剂消耗较少、检出限低,精密度高、空白含量低等优点。上述项目测定结果质量监控精密度、准确度等要求均满足 DZ/T0130—2006 中相关项目质量要求。

3.2 花岗岩锆石和伟晶岩独居石 U-Pb 年龄分析

锆石和独居石 U-Pb 同位素定年在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室 LA-ICP-MS 仪器上完成,所采用的激光剥蚀系统为 Coherent 公司生产的 GeoLasHD 193 nm 准分子激光器,电感耦合等离子体质谱仪为安捷伦公司生产的 7900 ICP-MS。测试过程中采用氦气为载气,氩气为补偿气,两者通过一个 T 型玻璃接口混合进入质谱仪,T 型玻璃接口与激光剥蚀系统之间配置有信号平滑装置(Hu et al.,2015),以达到平滑的分析信号。锆石激光剥蚀频率和束斑分布为 5Hz 和 32 μm,激光能量密度为 3.5J/cm²,以国际锆石标样 91500(Wiedenbeck et al.,2004)为外标校正分析过程中 U-Pb 同位素分馏,以国际锆石标样 Plešovice(Sláma et al.,2008)监控分析质量,以玻璃标准物质 NIST610 作外标校正微量元素分馏。独居石激光剥蚀频率和束斑分布为 3Hz 和 16 μm,激光能量密度为 3J/cm²,以国际独居石标样 TS-Mnz(Budzyń et al.,2021)为外标校正分析过程中 U-Pb 同位素分馏,以国际独居石标样 Bananeira(Gonçalves et al.,2016)监控分析质量,以玻璃标准

物质 NIST610 作外标校正微量元素分馏。每个分析数据点包括大约 20s 背景信号和 40s 样品剥蚀信号,对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 11.0(Liu et al.,2008,2010)完成。样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot 4.15 完成。

4 测试结果

4.1 主量元素特征

钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩具有较高的 SiO₂(71.26%~72.42%)、全碱(8.63%~9.48%)、Al₂O₃(16.54%~17.01%)含量和较低的 TiO₂(0.01%)、MnO(0.05%)、MgO(0.01%~0.04%)、CaO(0.14%~0.25%)和 P₂O₅(0.01%)含量(表 2)。全岩 K₂O/Na₂O 值平均为 0.77,具富钠特征。铝饱和指数均在 1.2 以上(1.26~1.41),属强过铝质岩石。在 A/CNK-A/NK 图解(图 8b)中,样品点全部投影在过铝质区域,分异指数高(93.0~94.0,平均值为 93.5),表明岩石经历了高度的分异演化。

相对于钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩,新鲜的中细粒黑云母二长花岗岩具较高的 SiO₂(75.25%~76.00%)、K₂O(4.62%~4.78%)、

表 2 海罗岭矿区花岗岩体主量元素含量(%)

Table 2 Major element contents (%) of the granite in the Hailuoling mining area

样号	21HLL03	21HLL04	21HLL05	21HLL07	21HLL08	21HLL19	21HLL20	21HLL21
岩性	中细粒黑云母二长花岗岩			硅化中细粒黑云母二长花岗岩		钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩		
SiO ₂	75.25	76.00	75.52	77.34	74.08	71.26	72.36	72.42
TiO ₂	0.05	0.05	0.05	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
Al ₂ O ₃	12.97	12.59	12.90	13.29	15.08	17.01	16.54	16.78
Fe ₂ O ₃	0.24	0.36	0.27	0.04	0.04	0.14	0.10	0.04
FeO	0.93	0.87	0.84	0.34	0.54	0.70	0.68	0.73
MnO	0.04	0.05	0.04	0.02	0.02	0.05	0.05	0.05
MgO	0.08	0.10	0.13	0.01	0.01	0.04	0.04	0.01
CaO	0.75	0.52	0.49	0.25	0.28	0.22	0.25	0.14
Na ₂ O	3.52	3.54	3.86	4.05	5.48	5.28	5.07	4.86
K ₂ O	4.74	4.62	4.78	4.14	3.80	4.20	3.56	3.88
P ₂ O ₅	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
CO ₂	0.25	0.06	0.14	0.06	0.05	0.05	0.06	0.23
烧失量	1.24	1.14	0.99	0.48	0.57	0.98	1.22	0.89
总量	100.1	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.1
Na ₂ O+K ₂ O	8.26	8.16	8.64	8.19	9.28	9.48	8.63	8.74
K ₂ O/Na ₂ O	1.35	1.31	1.24	1.02	0.69	0.80	0.70	0.80
A/CNK	1.11	1.09	1.07	1.16	1.12	1.26	1.32	1.41
DI	93.8	94.5	95.2	96.5	96.2	94.0	93.4	93.0

注:A/CNK=Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)(分子比);DI—分异指数。

表 3 海罗岭矿区花岗岩体微量及稀土元素含量(×10⁻⁶)

Table 3 Trace and rare earth element concentrations (×10⁻⁶) of the granite in the Hailuoling mining area

样号	21HLL03	21HLL04	21HLL05	21HLL07	21HLL08	21HLL19	21HLL20	21HLL21
岩性	中细粒黑云母二长花岗岩			硅化中细粒黑云母二长花岗岩		钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩		
F	7675	5761	5307	2891	3548	8330	13076	10020
Re	0.47	0.24	0.15	0.54	0.39	1.85	0.16	0.26
Cu	6.92	2.51	2.89	2.34	2.95	2.28	2.91	3.04
Pb	1360	48.7	33.8	47.4	39.4	46.8	43.4	67.7
Zn	128	146	132	43	57	77	90	89
Cr	8.98	9.36	8.87	10.1	9.59	7.59	8.90	7.72
Ni	0.390	0.091	0.002	0.204	0.243	0.002	0.038	0.728
Co	0.890	0.780	0.760	0.870	1.06	0.720	0.798	0.972
Cd	0.271	0.062	0.029	0.125	0.117	0.106	0.138	0.139
Li	343	383	295	186	299	555	576	526
Rb	1071	1215	987	895	967	1291	1241	1031
Cs	16.3	22.9	16.2	12.0	15.9	8.59	9.24	10.1
W	41.3	11.5	146	18.9	15.2	13.3	13.1	17.6
Mo	1.98	1.91	1.41	2.47	2.30	16.8	14.5	21.2
As	4.49	0.84	0.96	1.94	1.97	1.49	1.25	3.59
Sb	0.016	0.001	0.001	0.001	0.023	0.001	0.001	0.002
Bi	3.30	2.84	2.63	0.334	2.08	27.3	29.2	38.4
Sr	27.7	20.6	21.8	4.96	7.33	10.3	14.0	11.5
Ba	132	146	110	33.0	33.1	79.2	79.3	83.8
V	5.61	5.56	5.34	5.24	5.23	5.10	5.19	5.12
Sc	2.82	3.27	3.34	2.07	2.27	2.76	3.18	2.82
Nb	97.6	86.5	108	98.8	73.1	60.7	66.3	84.9
Ta	7.68	7.90	8.8	31.4	23.0	179	136	237
Zr	140	141	142	45.6	58.4	33.9	32.5	35.4
Hf	8.30	9.36	9.98	6.70	7.58	9.08	7.87	8.44
Be	7.09	10.6	9.21	8.40	9.30	4.30	5.18	4.19
B	1.87	1.76	1.83	1.76	1.73	2.87	3.73	3.86
Ga	35.7	36.6	33.5	35.6	40.6	48.6	52.6	47.8
Sn	32.2	29.4	23.6	9.96	10.5	24.8	35.2	23.6
In	0.102	0.129	0.120	0.040	0.057	0.208	0.271	0.225
Tl	5.43	5.75	4.80	4.50	4.52	5.03	4.97	5.16
U	13.1	15.7	14.2	10.6	11.8	7.43	8.40	6.11
Th	62.4	96.8	85.0	26.1	31.6	24.3	27.7	17.6
Mn	311	351	302	108	147	326	379	340
Rb/Sr	38.7	59.0	45.3	180	132	125	88.6	89.7
Sr/Ba	0.21	0.14	0.20	0.15	0.22	0.13	0.18	0.14
Nb/Ta	12.7	11.0	12.3	3.15	3.18	0.34	0.49	0.36
Th/U	4.76	6.17	5.99	2.46	2.68	3.27	3.30	2.88
Zr/Hf	16.9	15.1	14.2	6.81	7.70	3.73	4.13	4.19
La	45.8	47.5	47.3	29.5	33.6	2.91	2.10	2.24
Ce	115	124	125	82.7	103	10.7	7.26	6.00
Pr	13.3	14.0	13.8	9.55	11.3	1.49	1.24	1.14
Nd	52.0	53.6	52.9	31.5	41.0	4.47	3.74	3.75
Sm	15.6	16.8	16.0	9.02	12.4	0.90	0.73	0.815
Eu	0.32	0.31	0.275	0.21	0.18	0.20	0.22	0.225
Gd	18.0	19.3	17.8	9.20	12.9	0.63	0.43	0.38
Tb	3.25	3.15	3.12	1.76	2.36	0.074	0.049	0.057
Dy	18.8	19.3	18.1	10.7	14.6	0.393	0.345	0.304
Ho	4.38	4.41	4.2	2.47	3.31	0.093	0.057	0.072
Er	13.4	13.4	12.8	8.19	11.3	0.234	0.183	0.224
Tm	2.20	2.30	2.15	1.61	2.00	0.104	0.09	0.098
Yb	16.0	16.8	15.3	13.0	15.4	0.800	0.759	0.822
Lu	2.40	2.34	2.36	1.75	2.26	0.172	0.151	0.158

续表 3

样号	21HLL03	21HLL04	21HLL05	21HLL07	21HLL08	21HLL19	21HLL20	21HLL21
Y	146	152	145	54.4	84.1	1.67	1.25	1.68
ΣREE	320	337	331	211	266	23.2	17.4	16.3
LREE	242	256	255	162	201	20.7	15.3	14.2
HREE	78.4	81.0	75.8	48.7	64.1	2.50	2.06	2.12
LREE/HREE	3.09	3.16	3.37	3.34	3.14	8.28	7.43	6.70
La _N /Yb _N	2.05	2.03	2.22	1.63	1.57	2.61	1.98	1.95
δEu	0.06	0.05	0.05	0.07	0.04	0.81	1.20	1.24
δCe	1.14	1.18	1.20	1.21	1.30	1.26	1.10	0.92
TE _{1,3}	1.04	1.03	1.05	1.13	1.12	1.09	1.17	1.05

注:TE_{1,3} 为四组分效应指数,据 Irber(1999)方法计算。

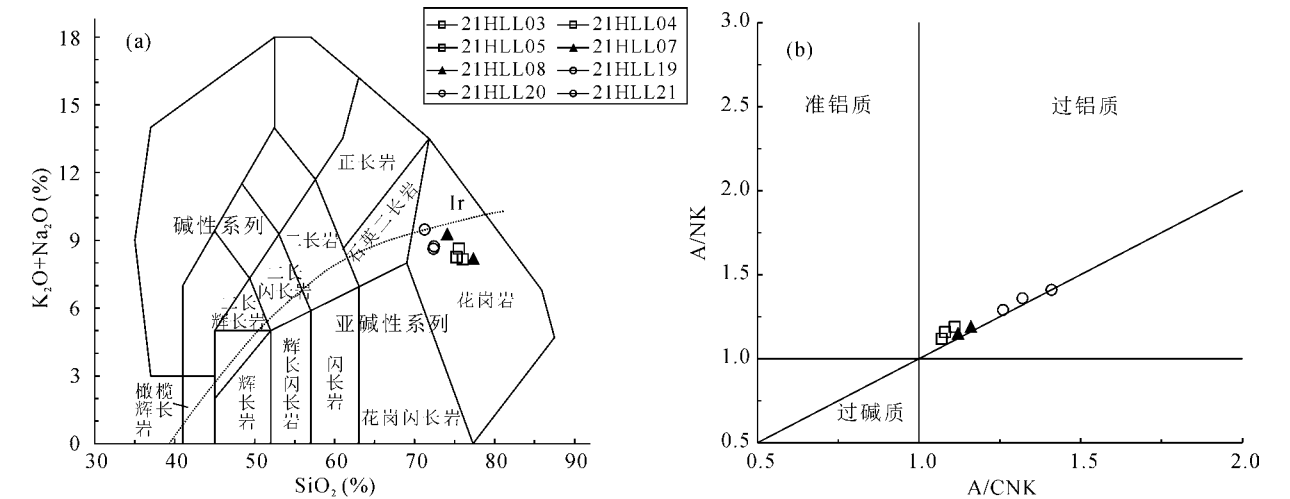


图 8 海罗岭矿区花岗岩体 SiO₂-(K₂O+Na₂O)分类图(a)及 A/CNK-A/NK 图解(b)

Fig. 8 SiO₂-(K₂O+Na₂O) diagram (a) and A/CNK-A/NK plot (b) of the granite in the Hailuoling mining area
(a)底图据 Middlemost (1994),图中碱性及亚碱性系列分界线据 Irvine et al. (1971);(b)底图据 Maniar et al. (1989)
(a) after Middlemost (1994), and the boundary between alkaline and subalkaline series in the figure after Irvine et al. (1971); (b) after Maniar et al. (1989)

TiO₂ (0.05%)、MgO (0.08% ~ 0.13%)、CaO (0.49%~0.75%)和 P₂O₅ (0.01%~0.02%)含量,全碱 (8.16% ~ 8.64%)、Al₂O₃ (12.59% ~ 12.97%)、Na₂O (3.52%~3.86%)和 MnO (0.04%~0.05%)含量偏低(表 2)。经历了硅化等蚀变的中细粒黑云母二长花岗岩较新鲜岩石具更高的 SiO₂ (74.08% ~ 77.34%)、Al₂O₃ (13.29% ~ 15.08%)、Na₂O (4.05%~5.48%)含量和更低的 TiO₂ (0.01% ~ 0.02%)、Fe₂O₃ (0.04%)、MnO (0.02%)、MgO (0.01%)、CaO (0.25%~0.28%)含量。中细粒黑云母二长花岗岩 F 含量大于 0.2%,P₂O₅ 含量在 0.1%左右,Al₂O₃ 含量小于 14.50%,SiO₂ 含量大于 73%,类型接近富氟低磷花岗岩(黄小龙等,1998);全岩 K₂O/Na₂O 值平均为 1.3,具富钾特征,铝饱和指数(1.07~1.11)偏低,属准铝和弱过铝质花岗岩到强过铝质岩石,分异指数

高(93.8~95.2,平均值为 94.5),表明岩石经历了高度的分异演化。

总体上看,中粒斑状黑云母二长花岗岩与中细粒黑云母二长花岗岩均属亚碱性系列,全部落在典型花岗岩区(图 8a),两者均属于过铝质岩石(图 8b)。从早期中粒斑状黑云母二长花岗岩到晚期中细粒黑云母二长花岗岩,岩石中 K₂O 和 P₂O₅ 含量升高,而 Al₂O₃、MnO、Na₂O 和 F 的含量降低(表 2、表 3),早期钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩显示出富氟、富钠、富铝的特征,这与宜春雅山复式岩体晚期锂云母花岗岩中 F 和 P 含量显著升高的现象明显不同(李洁和黄小龙,2013)。

4.2 稀土及微量元素特征

钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩稀土总量 ΣREE 为 16.3×10⁻⁶~23.2×10⁻⁶,平均为 19.0×10⁻⁶(表 3)。La_N/Yb_N 值为 1.95~2.61,

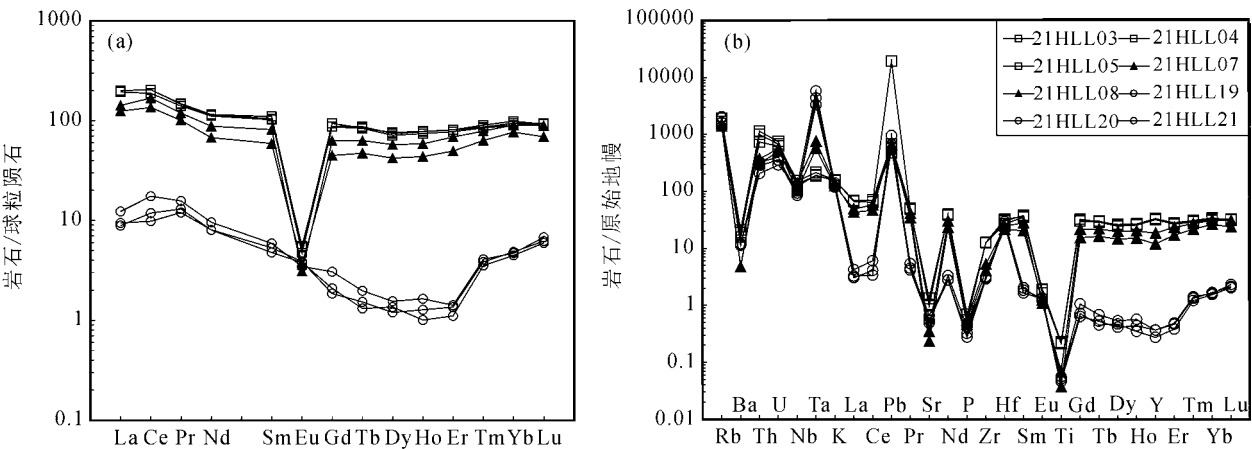


图 9 海罗岭矿区花岗岩体稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(a, 标准化数值据 Sun and McDonough, 1989)及微量元素原始地幔标准化蛛网图(b, 标准化数值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 9 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a, normalized values after Sun and McDonough, 1989) and primitive mantle-normalized trace element spider grams (b, normalized values after Sun and McDonough, 1989) of the granite in the Hailuoling mining area

平均为 2.18, $\delta\text{Eu}=0.81\sim1.24$, 平均为 1.08, 轻稀土富集, 轻重稀土分异明显, 具弱的正铕异常和“四分组”效应($\text{TE}_{1,3}$ 值平均为 1.10)(图 9a)。岩石富含挥发性组分 F 及 Li、Rb、Nb、Ta 等, 具明显的 Rb、Ta、Pb、Nd、Hf 的正异常和 Ba、Nb、Sr、P、Ti 的负异常(图 9b), Nb/Ta 值(0.34~0.49, 平均为 0.39)和 Zr/Hf 值(3.73~4.19, 平均值为 4.02)低。

中细粒黑云母二长花岗岩稀土总量 ΣREE 为 $320\times10^{-6}\sim337\times10^{-6}$, 平均为 329×10^{-6} (表 3)。 $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ 值为 2.03~2.22, 平均为 2.10, $\delta\text{Eu}=0.05\sim0.06$, 平均为 0.05, 轻重稀土分异不明显, 具强的负铕异常(图 9a), 表明岩石经历了高度的分异演化。岩石中富含挥发性组分 F 以及 Li、Rb、Nb 等, 而 Ta 含量低, 具有明显的 Rb、Th、Pb、Nd、Hf 的正异常和 Ba、Nb、Sr、P、Ti 的负异常(图 9b), Nb/Ta 值(11.0~12.7, 平均为 12.0)和 Zr/Hf 值(14.2~16.9, 平均为 15.4)较低。经历了硅化等蚀变的中细粒黑云母二长花岗岩稀土总量 ΣREE 为 $211\times10^{-6}\sim266\times10^{-6}$, 平均为 239×10^{-6} , 较未蚀变的中细粒黑云母二长花岗岩 Ta 含量明显增高, Nb/Ta、Zr/Hf 值降低, Nb/Ta 平均值降为 3.16。

4.3 锆石 U-Pb 年龄

分析了海罗岭中细粒黑云母二长花岗岩样品(21HLL10)30 个测点, 其中有效点 16 个, 样品中锆石为无色透明或浅黄色, 透明一半透明, 大部分锆石结晶较好, 呈柱状或长柱状, 长径 80~200 μm , 长宽

比多为 1.5:1~2:1, 阴极发光(CL)图像(图 10a)显示, 锆石具内部结构和弱的岩浆环带, 少部分锆石 CL 图像中呈黑色。样品 21HLL10 共获得 16 个有效测试点数据, 这些锆石的 U 含量变化范围在 $4647\times10^{-6}\sim15172\times10^{-6}$, Th 的变化范围在 $1501\times10^{-6}\sim12553\times10^{-6}$ 之间, Th/U 值变化范围在 0.25~0.83 之间, 均大于 0.1, 表明它们均为典型岩浆结晶锆石(表 4)。

在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图中, 样品 21HLL10 点都落在谐和线上或靠近谐和线(图 10b), 表明被测锆石未遭受明显的后期热事件的影响。其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 139.1~143.7 Ma 之间, 经计算获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄统计权重平均值为 141.9 ± 1.1 Ma(MSWD=0.17, 2σ)(图 10c), 属早白垩世。

4.4 独居石 U-Pb 年龄

云母锂辉石伟晶岩样品(21HLL12)独居石呈浅黄色、透明, 为半自形—自形短柱状、粒状, 粒径在 40~180 μm 之间。背散射(BSE)图像中独居石内部结构均匀, 部分边部出现晶棱圆化、港湾状结构, 独居石颗粒整体成分均匀, 无明显环带。伟晶岩独居石 U-Pb 同位素测定结果见表 5。对 25 颗独居石进行 U-Pb 同位素测年, 本次共获得 17 个有效点, $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 年龄值均分布于谐和曲线上或附近, 故优先选取 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 加权平均年龄, 为 141.68 ± 0.69 Ma(MSWD=2.2, $n=17$)(图 11a、b)。

表 4 海罗岭矿区中细粒黑云母二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果
Table 4 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating result of the granite in the Hailuoling mining area

序号	测点	元素含量($\times 10^{-6}$)			同位素比值								同位素年龄值(Ma)								
		Pb	²³² Th	²³⁸ U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	2σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	2σ		
样品号: 21HLL10; 岩性: 中细粒黑云母二长花岗岩; 采样位置: E116°25'43", N26°18'45"																					
1	21HLL10-02	215	3054	8130	0.38	0.0507	0.0033	0.1551	0.0094	0.0222	0.0007	0.0077	0.0004	227.8	147.2	146.4	8.3	141.5	4.5	155.1	7.8
2	21HLL10-03	165	2160	6450	0.33	0.0482	0.0028	0.1477	0.0086	0.0222	0.0007	0.0073	0.0004	122.3	120.4	139.9	7.6	141.3	4.2	147.4	7.1
3	21HLL10-05	139	1501	5377	0.28	0.0562	0.0032	0.1738	0.0106	0.0224	0.0007	0.0081	0.0004	457.5	130.5	162.7	9.1	142.9	4.6	164.0	8.0
4	21HLL10-07	146	2191	5591	0.39	0.0492	0.0028	0.1499	0.0092	0.0221	0.0007	0.0070	0.0004	166.8	135.2	141.8	8.1	141.0	4.5	140.6	7.7
5	21HLL10-08	364	6706	12758	0.53	0.0560	0.0035	0.1735	0.0121	0.0224	0.0007	0.0073	0.0004	450.0	138.9	162.4	10.5	142.8	4.3	146.9	7.8
6	21HLL10-12	285	3907	11273	0.35	0.0503	0.0030	0.1553	0.0098	0.0223	0.0007	0.0071	0.0004	209.3	137.0	146.5	8.7	142.4	4.2	143.2	7.7
7	21HLL10-13	140	3357	4647	0.72	0.0497	0.0030	0.1533	0.0093	0.0223	0.0007	0.0067	0.0003	183.4	138.9	144.8	8.2	142.3	4.2	136.0	6.9
8	21HLL10-14	342	3469	14068	0.25	0.0541	0.0030	0.1671	0.0102	0.0223	0.0007	0.0082	0.0004	376.0	119.4	156.9	8.9	142.1	4.6	165.3	8.9
9	21HLL10-15	478	12553	15172	0.83	0.0511	0.0027	0.1575	0.0088	0.0222	0.0007	0.0071	0.0004	255.6	122.2	148.5	7.7	141.8	4.2	142.1	7.7
10	21HLL10-17	313	3519	12604	0.28	0.0528	0.0034	0.1656	0.0118	0.0225	0.0008	0.0081	0.0005	320.4	146.3	155.6	10.3	143.7	5.3	164.0	9.5
11	21HLL10-19	129	2358	4868	0.48	0.0494	0.0037	0.1535	0.0113	0.0223	0.0007	0.0065	0.0004	164.9	166.6	145.0	9.9	142.4	4.6	130.3	7.3
12	21HLL10-21	118	1719	4687	0.37	0.0529	0.0042	0.1625	0.0157	0.0218	0.0009	0.0069	0.0005	324.1	149.1	152.9	13.7	139.1	5.6	138.8	9.5
13	21HLL10-23	178	2221	7221	0.31	0.0500	0.0029	0.1547	0.0099	0.0222	0.0008	0.0074	0.0004	194.5	137.0	146.0	8.7	141.6	4.9	148.5	8.6
14	21HLL10-25	174	3680	6196	0.59	0.0477	0.0028	0.1464	0.0080	0.0221	0.0007	0.0066	0.0003	87.1	133.3	138.7	7.1	141.0	4.3	132.3	6.5
15	21HLL10-26	195	3725	6988	0.53	0.0502	0.0033	0.1541	0.0096	0.0222	0.0007	0.0070	0.0004	211.2	151.8	145.5	8.5	141.4	4.5	141.3	7.5
16	21HLL10-30	138	3113	4691	0.66	0.0541	0.0053	0.1681	0.0162	0.0224	0.0008	0.0067	0.0005	376.0	222.2	157.7	14.1	142.5	5.2	135.4	11.0

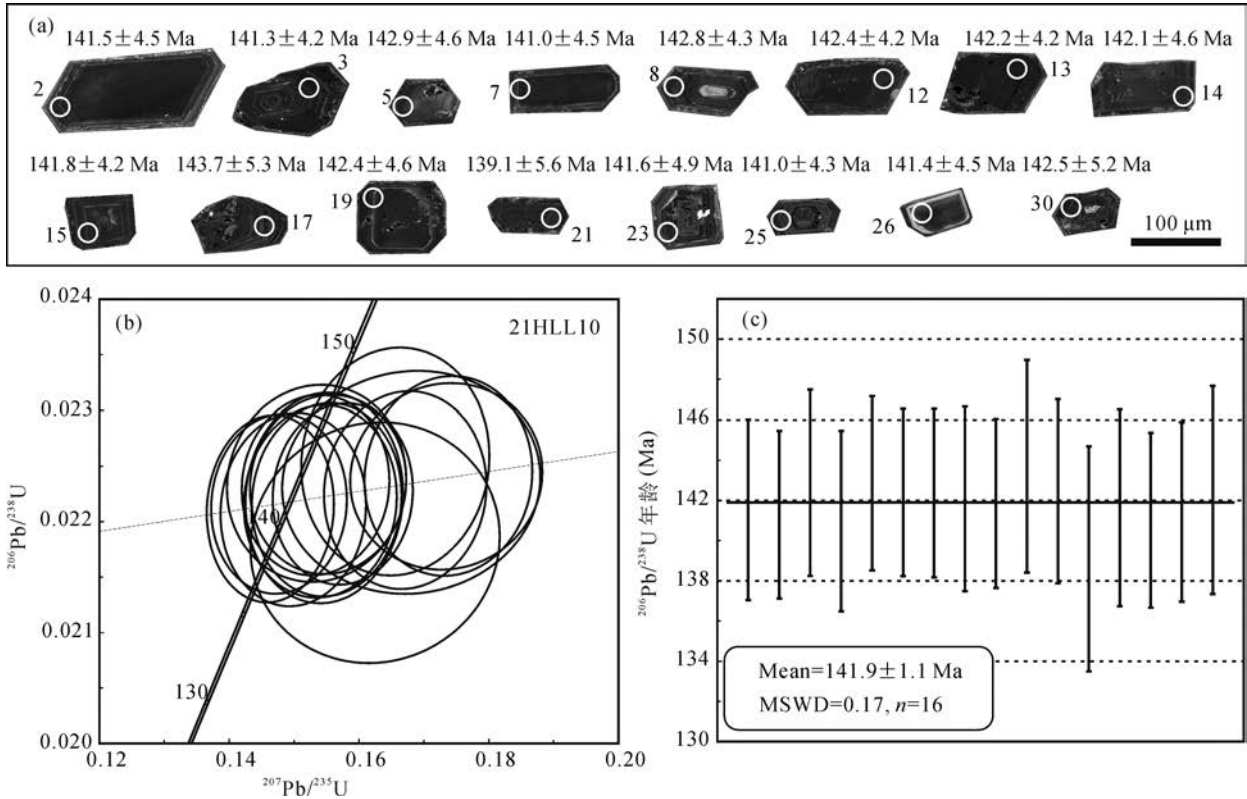


图 10 海罗岭矿区中细粒黑云母二长花岗岩 CL 图像、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 视年龄值(a)和锆石 U-Pb 谐和图(b,c)
Fig. 10 CL images, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ apparent ages (a) and zircon U-Pb concordant diagrams (b, c)
of the medium-fine grained granite bearing biotite in the Hailuoling mining area

碱性长石伟晶岩样品(21HLL15)独居石呈浅黄色、透明,为半自形—自形短柱状、粒状,粒径在 40~125 μm 之间。背散射(BSE)图像中独居石内部结构相对均匀,部分表面具有熔蚀特征,边部出现晶棱圆化、港湾状结构,独居石颗粒整体成分均匀,无明显环带。伟晶岩独居石 U-Pb 同位素测定结果见表 5。对 25 颗独居石进行 U-Pb 同位素测年,本次共获得 16 个有效点, $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 年龄值均分布于谐和线上或附近,故优先选取 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 加权平均年龄,为 137.62 ± 0.73 Ma(MSWD=3.6, n=16),略晚于云母锂辉石伟晶岩(图 11c,d)。

5 讨论

5.1 对铌钽等稀有金属成矿的认识

海罗岭矿区蚀变作用经历了早期的钠长石化、白云母化、黄玉化,晚期的绢云母化、硅化、高岭土化、绿泥石化等,呈现出碱性长石化到云英岩化的演化过程。花岗岩成矿的这些交代蚀变过程,正是碱金属有规律的更替过程,即 K→Na(南京大学地质学系,1981)。钠长石化与铌钽矿化密切相关,钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩(富钽花

岗岩) $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值最低,平均为 0.77,显著富钠,指示钠长石化程度与铌钽矿化强度呈正相关性。

海罗岭富钽花岗岩中“雪球结构”普遍且完整,表明成岩和成矿体系的封闭性较好(胡受奚等,2004),这种良好的封闭条件同样表现在岩体与围岩的接触带上似伟晶岩的发育(王玉荣等,1979;林德松,1993)。然而,体系的封闭条件对稀有金属成矿至关重要,当含 Ta、Nb 等稀有元素的岩浆向上侵位时,封闭条件有利于降低熔体温度,促使侵入体上部挥发分的聚集(林德松,1996)。赵振华等(1992)提出 F 等挥发分的大量存在为稀有金属的运移提供了有利条件,也是熔体-流体相互作用的重要控制因素。花岗岩体系中 HF 的存在会使斜长石中钙长石组分分解成萤石、黄玉和石英,在 HF 逸度较高时生成钠长石(熊小林等,1996)。而黄玉正是一种含 F 的硅铝酸盐,是典型的气成热液矿物(熊小林等,1999)。

海罗岭铌钽矿床围岩主要为南华系巨厚层状变质砂岩等,具有良好的封闭条件,海罗岭花岗岩显著特征为富含挥发性组分 F,因此,封闭的体系-聚集的挥发分共同促使钠长石化、白云母化、黄玉化等热

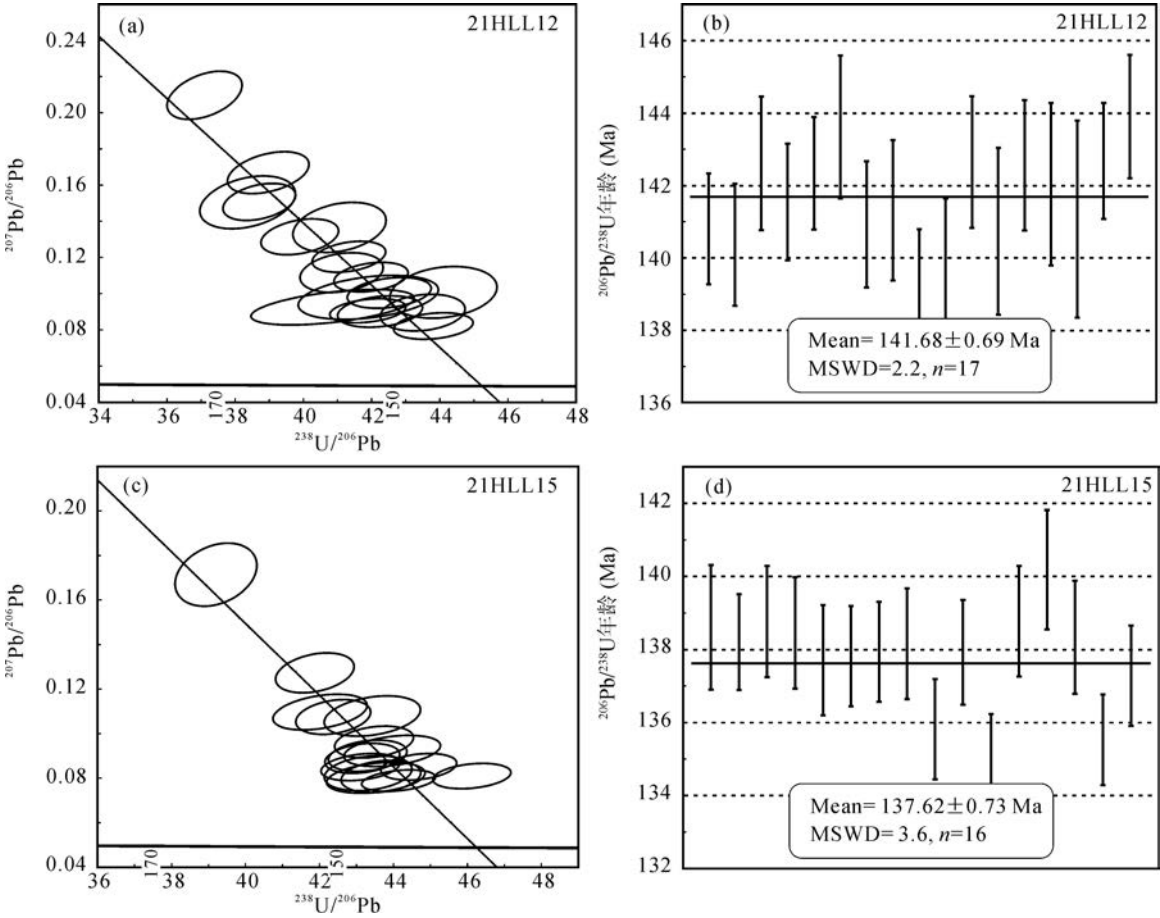


图 11 海罗岭矿区伟晶岩独居石 U-Pb 谐和图和加权平均年龄图

Fig. 11 Monazite U-Pb concordia diagrams and weighted average age diagrams of pegmatite in the Hailuoling mining area

液蚀变的发育,而蚀变作用的发生对该地区稀有金属成矿极为关键。徐克勤等(1982,1983)提出与陆壳改造型花岗岩有关的钨、锡、稀有金属等矿床的形成过程中,单纯的花岗岩形成作用的活化转移,还不足以导致有关矿床的形成,还必须有热液过程中的碱交代活化转移,使富集在年轻花岗岩之造岩矿物中的成矿元素转移浸出,进一步富集形成矿床。海罗岭花岗岩钠长石化为碱交代中的钠交代,叠加的白云母化则为钾质交代,这些交代蚀变过程中正是稀有金属成矿的过程。

5.2 全岩 F、ΣREE 含量及 Nb/Ta、Zr/Hf、K/Rb 值对稀有金属成矿的指示

前人将南岭地区含钨锡铌钽花岗岩划分为含钨花岗岩、含锡花岗岩、含钽铌花岗岩,并对其岩石地球化学特征进行了系统的总结(陈骏等,2008),其中含钽铌花岗岩 TiO_2 含量和 $\text{CaO}/(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 值低, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 和 Rb/Sr 值明显偏高,强过铝质,贫 Ba+Sr、稀土和高场强元素,钨亏损强烈,明显富 Rb 和 Nb,高度分异演化。海罗岭富钽花岗岩地球

化学特征与南岭地区稀有金属花岗岩特征基本相似,但钨亏损不明显, δEu 平均为 1.08, 显示出弱的正铕异常。这可能为围岩斜长石在水-岩反应中蚀变水解导致的,海罗岭富钽花岗岩具有明显的热液流体作用特征(樊献科,2019)。

研究显示,花岗岩的 F 含量、Nb/Ta 值、Zr/Hf 值和稀土“四分组”效应等特征,能指示花岗岩是否经历了岩浆-流体的相互作用过程(赵振华等,1992; Zaraisky et al., 2008; Ballouard et al., 2016)。海罗岭花岗岩富挥发性组分 F, 特别是钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩中 F 含量最高, Nb/Ta 值均小于 5、Zr/Hf 值均小于 10 和稀土“四分组”效应等特征,共同揭示海罗岭铌钽成矿的过程,可能发生了强烈的热液交代作用。

挥发分在花岗岩型稀有金属成矿过程中发挥的重要作用已经形成共识(李启津,1986; 赵振华等, 1992; 李福春等, 2000; 熊小林等, 2002; 朱金初等, 2002; Xu et al., 2023), F 等挥发分的大量存在为稀有金属的运移提供了有利条件,也是熔体-流体相互

表 5 海罗岭矿区伟晶岩 LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 定年结果

Table 5 LA-ICP-MS monazite U-Pb dating result of the pegmatite in the Hailuoling mining area

序号	测点	元素含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值					同位素年龄值(Ma)										
		Pb	²³² Th	²³⁸ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁹ Pb/ ²³⁸ U	2σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	2σ			
样品号: 21HLL12; 岩性: 云母辉石伟晶岩; 采样位置: E116°25'43", N26°18'45"																					
1	21HLL12-01	1236	206452	3196	64.60	0.0251	0.0006	0.1334	0.0088	0.4542	0.0264	0.0070	0.0001	2143.5	114.8	380.2	18.5	159.6	3.7	140.8	1.5
2	21HLL12-03	1377	226325	3948	57.32	0.0257	0.0006	0.1684	0.0113	0.5903	0.0308	0.0070	0.0001	2542.6	113.0	471.1	19.7	163.3	4.0	140.4	1.7
3	21HLL12-05	1256	205125	3539	57.97	0.0244	0.0007	0.1339	0.0110	0.4588	0.0365	0.0071	0.0001	2150.3	144.1	383.4	25.4	155.1	4.2	142.6	1.8
4	21HLL12-06	1395	228101	3605	63.28	0.0258	0.0006	0.1542	0.0090	0.5367	0.0279	0.0070	0.0001	2394.4	100.0	436.3	18.5	164.4	3.6	141.5	1.6
5	21HLL12-07	1587	253958	5378	47.22	0.0242	0.0005	0.1229	0.0074	0.4016	0.0222	0.0071	0.0001	1999.1	106.5	342.8	16.1	154.1	3.2	142.3	1.6
6	21HLL12-08	1265	204341	3477	58.77	0.0261	0.0008	0.1477	0.0108	0.5408	0.0404	0.0071	0.0001	2320.4	126.2	438.9	26.6	165.9	4.9	143.6	2.0
7	21HLL12-09	1555	251174	4538	55.35	0.0270	0.0007	0.2154	0.0113	0.7789	0.0367	0.0070	0.0001	2946.6	84.9	584.9	20.9	171.4	4.1	140.9	1.7
8	21HLL12-10	2135	346958	6913	50.19	0.0239	0.0005	0.0903	0.0059	0.2981	0.0169	0.0070	0.0001	1433.0	125.9	264.9	13.3	152.1	3.3	141.3	1.9
9	21HLL12-11	1365	226132	4337	52.15	0.0227	0.0007	0.0979	0.0131	0.3149	0.0357	0.0069	0.0001	1584.9	247.2	277.9	27.6	144.5	4.2	139.0	1.8
10	21HLL12-12	1485	245292	4869	50.37	0.0239	0.0010	0.0915	0.0092	0.3222	0.0307	0.0069	0.0001	1457.4	192.6	283.6	23.5	152.0	6.0	139.4	2.2
11	21HLL12-13	1648	266319	5534	48.12	0.0235	0.0006	0.0977	0.0079	0.3256	0.0215	0.0071	0.0001	1583.3	145.8	286.2	16.5	149.9	3.5	142.6	1.8
12	21HLL12-15	1141	187179	3477	53.83	0.0245	0.0012	0.0887	0.0090	0.3121	0.0233	0.0070	0.0001	1398.2	197.4	275.8	18.0	155.9	7.4	140.7	2.3
13	21HLL12-16	2138	348403	6336	54.99	0.0238	0.0005	0.1134	0.0107	0.3584	0.0210	0.0071	0.0001	1854.0	172.1	311.0	15.7	151.8	3.2	142.6	1.8
14	21HLL12-17	1297	201841	6470	31.20	0.0230	0.0005	0.0886	0.0130	0.2837	0.0257	0.0071	0.0001	1394.8	284.4	253.6	20.3	146.5	3.4	142.0	2.2
15	21HLL12-22	1421	232811	4348	53.54	0.0243	0.0006	0.1093	0.0084	0.3743	0.0291	0.0070	0.0001	1788.0	142.1	322.8	21.5	154.9	3.7	141.1	2.7
16	21HLL12-24	1427	227452	5098	44.62	0.0228	0.0005	0.0831	0.0065	0.2585	0.0183	0.0071	0.0001	1272.2	153.7	233.5	14.8	145.5	3.1	142.7	1.6
17	21HLL12-25	1395	220829	4751	46.48	0.0237	0.0006	0.0884	0.0081	0.2941	0.0225	0.0071	0.0001	1390.7	180.6	261.8	17.6	150.8	3.6	143.9	1.7
样品号: 21HLL15; 岩性: 碱性长石伟晶岩																					
1	21HLL15-02	2064	346597	4815	71.98	0.0238	0.0006	0.1113	0.0101	0.3598	0.0199	0.0069	0.0001	1821.3	164.8	312.1	14.9	151.6	3.7	138.6	1.7
2	21HLL15-03	1495	244024	5395	45.23	0.0239	0.0005	0.1284	0.0075	0.4190	0.0229	0.0069	0.0001	2076.2	103.4	355.3	16.4	152.1	3.1	138.2	1.3
3	21HLL15-04	1570	256162	5560	46.07	0.0231	0.0005	0.0911	0.0061	0.2868	0.0176	0.0069	0.0001	1450.0	126.7	256.0	13.9	147.2	2.9	138.8	1.5
4	21HLL15-05	1375	216621	7004	30.93	0.0229	0.0005	0.0810	0.0068	0.2550	0.0181	0.0069	0.0001	1221.3	166.7	230.6	14.6	146.0	2.9	138.4	1.5
5	21HLL15-06	1252	208728	3579	58.31	0.0230	0.0006	0.1073	0.0079	0.3425	0.0223	0.0068	0.0001	1754.0	134.7	299.1	16.9	146.7	3.6	137.7	1.5
6	21HLL15-08	1404	232723	4155	56.01	0.0232	0.0004	0.0896	0.0059	0.2840	0.0170	0.0068	0.0001	1417.0	125.9	253.8	13.4	147.7	2.8	137.8	1.4
7	21HLL15-09	1582	259140	5556	46.64	0.0224	0.0004	0.0849	0.0050	0.2625	0.0145	0.0068	0.0001	1322.2	119.4	236.7	11.6	142.7	2.6	137.9	1.4
8	21HLL15-10	2084	346774	4739	73.18	0.0236	0.0005	0.1074	0.0076	0.3496	0.0199	0.0069	0.0001	1766.7	129.0	304.4	15.0	150.4	2.9	138.2	1.5
9	21HLL15-11	1472	239394	6598	36.28	0.0217	0.0004	0.0800	0.0047	0.2420	0.0133	0.0067	0.0001	1198.2	116.7	220.0	10.9	138.3	2.6	135.8	1.4
10	21HLL15-12	1357	222652	4297	51.82	0.0232	0.0005	0.0854	0.0055	0.2717	0.0152	0.0068	0.0001	1325.0	130.6	244.0	12.1	147.8	3.0	137.9	1.4
11	21HLL15-14	1098	184209	3464	53.18	0.0227	0.0006	0.0908	0.0060	0.2891	0.0169	0.0067	0.0001	1442.6	127.0	257.9	13.3	145.0	3.5	134.9	1.4
12	21HLL15-15	1013	164401	2795	58.82	0.0255	0.0006	0.1721	0.0118	0.6027	0.0390	0.0069	0.0001	2588.9	113.7	479.0	24.7	162.4	3.7	138.8	1.5
13	21HLL15-17	1094	178192	3680	48.43	0.0230	0.0006	0.0770	0.0063	0.2539	0.0171	0.0070	0.0001	1121.9	163.1	229.7	13.8	146.4	3.6	140.2	1.6
14	21HLL15-18	1010	167150	3218	51.94	0.0231	0.0005	0.0780	0.0067	0.2615	0.0199	0.0069	0.0001	1146.3	171.8	235.9	16.0	147.1	3.3	138.3	1.5
15	21HLL15-19	1679	288290	4219	68.32	0.0230	0.0005	0.0974	0.0058	0.3051	0.0178	0.0067	0.0001	1575.9	111.1	270.4	13.9	146.6	2.9	135.5	1.2
16	21HLL15-20	1643	267699	7055	37.95	0.0227	0.0004	0.0790	0.0042	0.2465	0.0117	0.0068	0.0001	1173.2	105.6	223.7	9.5	144.4	2.6	137.3	1.4

作用的重要控制因素(赵振华等,1992)。海罗岭富钽花岗岩中 F 含量最高,达到 $8330 \times 10^{-6} \sim 13076 \times 10^{-6}$,平均为 10475×10^{-6} ,与宜春雅山 414 钽铌矿中富钽的锂云母花岗岩 F 含量 ($1.69\% \sim 1.82\%$)较为接近(李洁和黄小龙,2013)。对比华南主要稀有金属花岗岩,F 含量与 Ta、Li 矿化富集程度呈明显的正相关(图 12a,e),而与 Nb 矿化富集程度不明显(图 12c)。

海罗岭富钽花岗岩中稀土总量极低, ΣREE 为 $16.3 \times 10^{-6} \sim 23.2 \times 10^{-6}$,平均为 19.0×10^{-6} ,落入前人总结的南岭含钽铌花岗岩 ΣREE 为 $0.53 \times 10^{-6} \sim 50.3 \times 10^{-6}$ (平均为 19.1×10^{-6})的范围内,且与其平均值极为接近(陈骏等,2008)。对比华南主要稀有金属花岗岩,显示稀土总量与 Li 富集程度呈显著的负相关(图 12f),即稀土总量越低,Li 含量越高,与 Ta 富集程度具有一定的负相关(图 12b),

但稀土总量与 Nb 富集程度不明显(图 12d)。Ta 和 Li 矿化的花岗岩稀土总量一般都小于 40×10^{-6} ,但并非稀土总量小于 40×10^{-6} 就一定成矿。

前人研究显示,不同时代花岗岩从老到新,铌和钽趋向增加,但 Nb/Ta 值总体趋向减小,在复式花岗岩体中,从早阶段到晚阶段,Nb/Ta 值也趋向减小(南京大学地质学系,1981)。Ballouard et al. (2016)提出 Nb/Ta=5 是划分过铝质花岗岩纯岩浆体系(Nb/Ta > 5)和岩浆-热液体系(Nb/Ta < 5)的分界值,也是区分矿化过铝质花岗岩的标志。海罗岭硅化的中细粒黑云母二长花岗岩与未蚀变岩石比较,Nb/Ta 平均值由 11.99 降至 3.16,钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩中 Ta 含量为 $136 \times 10^{-6} \sim 237 \times 10^{-6}$,而 Nb/Ta 值平均为 0.39。与赣西地区宜春雅山锂云母花岗岩和宜丰锂白云母花岗岩,赣北横峰松树岗黄玉钠长石花岗岩,广西栗

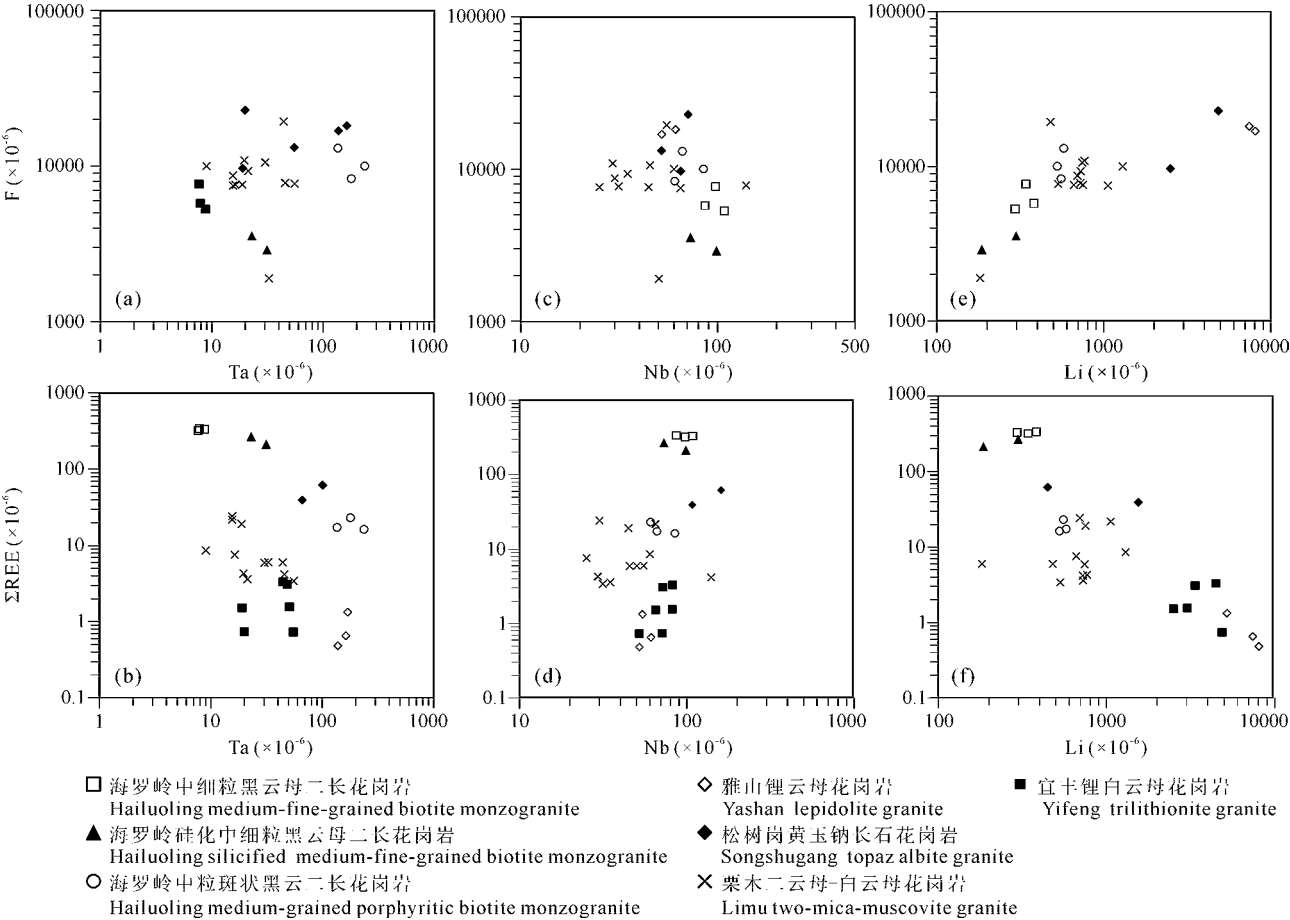


图 12 华南稀有金属矿床中花岗岩 F-Ta、F-Nb、F-Li 和 ΣREE -Ta、 ΣREE -Nb、 ΣREE -Li 协变图解

Fig. 12 F-Ta, F-Nb, F-Li and ΣREE -Ta, ΣREE -Nb, ΣREE -Li covariation diagram of granites in rare metal deposits in South China

数据来源据李洁和黄小龙,2013;杨泽黎等,2014;Zhu et al., 2015;董业才和丁汝福,2016;Xie et al., 2019;李仁泽等,2020

Data from Li Jie and Huang Xiaolong, 2013; Yang Zeli et al., 2014; Zhu et al., 2015; Dong Yecai and Ding Rufu, 2016; Xie et al., 2019; Li Renze et al., 2020

木二云母-白云母花岗岩对比分析,显示花岗岩型钽铌矿中 Nb/Ta 值与 Ta 矿化富集强度均呈明显的负相关(图 13a),Ta 含量大于 50×10^{-6} 的花岗岩,其 Nb/Ta 值均小于 2,而 Ta 含量大于 120×10^{-6} 的花岗岩,即达到工业品位以上,其 Nb/Ta 值均小于 1。Nb/Ta 值与 Nb 矿化富集程度表现为弱的正相关(图 13d),与 Li 矿化富集程度相关性不明显

(图 13g)。因此,推测 Nb/Ta 值小于 2 可以作为形成钽矿化的良好标志,Nb/Ta 值小于 1,可能是形成工业品位以上钽矿化的判别标志。

在花岗岩成岩或稀有金属成矿过程中,锆和铪的分离是经常有规律地发生的,从过程的早阶段到过程的晚阶段,Zr/Hf 值是趋向减小的(南京大学地质学系,1981)。Zr/Hf 值是花岗岩成因关系、分馏

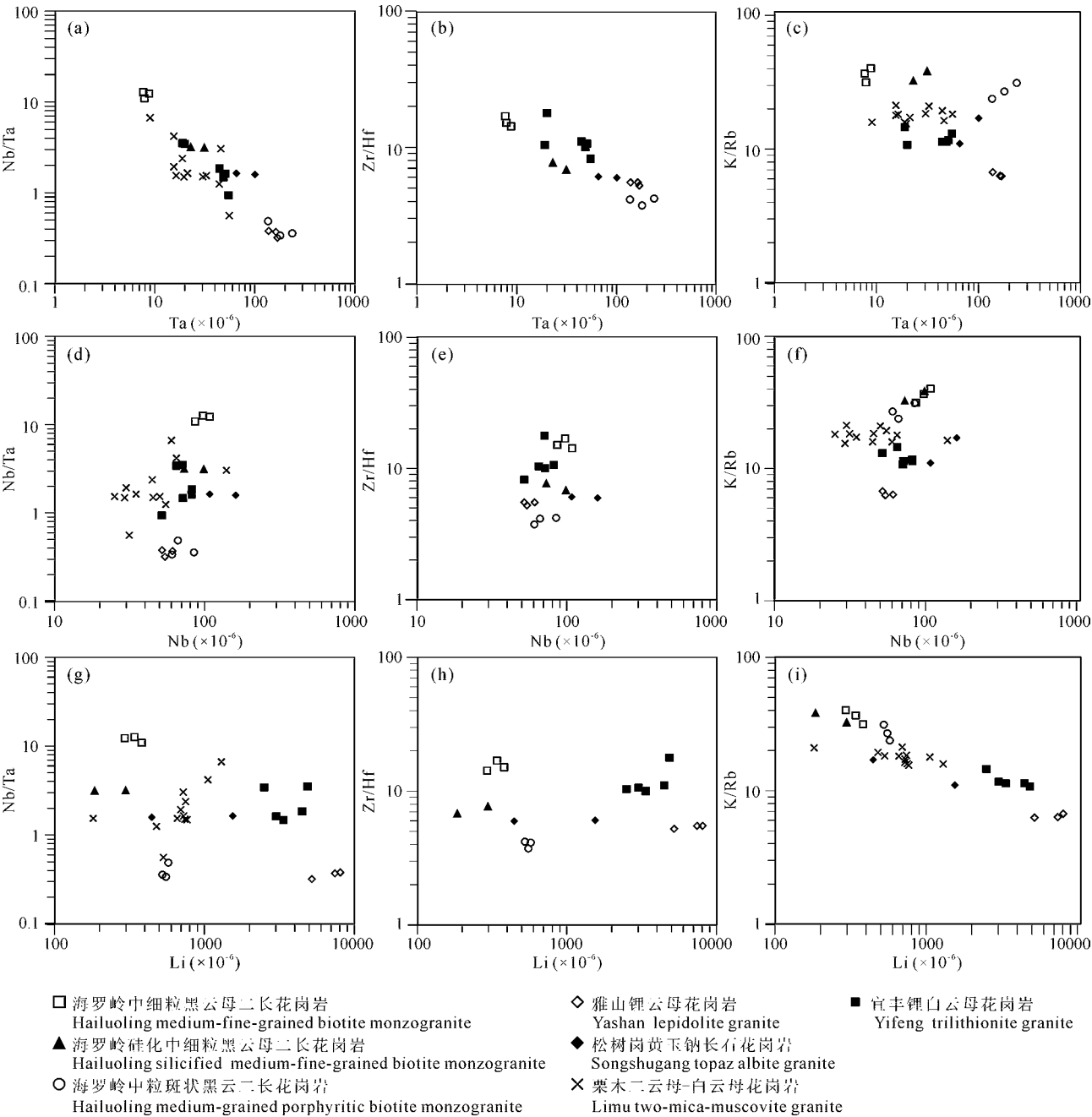


图 13 华南稀有金属矿床中花岗岩微量元素比值与含矿性图解

Fig. 13 Diagrams of granites trace element ratio and ore potentiality in rare metal deposits in South China

数据来源据李洁和黄小龙,2013;杨泽黎等,2014;Zhu et al., 2015;董业才和丁汝福,2016;Xie et al., 2019;李仁泽等,2020

Data from Li Jie and Huang Xiaolong, 2013; Yang Zeli et al., 2014; Zhu et al., 2015; Dong Yecai and Ding Rufu, 2016; Xie et al., 2019; Li Renze et al., 2020

程度和稀有金属成矿潜力的可靠指标, Zr/Hf 值 < 25 时, 具有寻找 Sn、W、Mo、Be 等矿床的较好找矿前景, 而 Zr/Hf 值 < 10 是形成 Ta 矿床的条件 (Zaraisky et al., 2008)。华南主要钽铌矿化花岗岩大多具有 Zr/Hf 值小于 10 的特征 (图 13b、e、h), 不过 Zr/Hf 值 < 10 并不一定能够成矿。 Zr/Hf 值与 Ta 矿化富集强度呈明显的负相关 (图 13b), 即 Zr/Hf 值越小, Ta 越富集, 但与 Nb、Li 矿化富集程度相关性不明显 (图 13d、h)。

K/Rb 值可作为花岗岩中钽矿化的地球化学指示剂, 也是一个有意义的找矿标志 (林德松, 1978)。华南地区主要钽铌矿化花岗岩具有较低的 K/Rb 值, 多数 < 40 , 平均值为 19.26, 与林德松 (1978) 总结的南岭地区七个含钽、铌矿床中主矿体带内花岗岩 K/Rb 值基本一致。整体上, K/Rb 值与 Ta、Li 矿化富集强度呈明显的负相关 (图 13c、i), 与 Nb 矿化富集程度表现为弱的正相关 (图 13f)。初步总结含钽矿化花岗岩中 K/Rb 值 < 40 , 含铌矿化花岗岩中 K/Rb 值 < 20 。

5.3 燕山期钽铌矿成矿对赣南地区稀有金属找矿的指示意义

本次研究获得的海罗岭中细粒黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 141.9 ± 1.1 Ma, 归属于早白垩世, 其形成于中粒斑状黑云母二长花岗岩之后, 因此中细粒黑云母二长花岗岩年龄代表了中粒斑状黑云母二长花岗岩年龄的下限。

锆石 U-Pb 同位素体系是伟晶岩定年中常用的方法, 但因伟晶岩中的锆石往往具有高的 U 含量, 易发生蜕晶化甚至重结晶作用等, 使得运用锆石 U-Pb 定年来限定伟晶岩的形成时代存在诸多困难 (蒋少涌等, 2021)。独居石是中酸性花岗岩、伟晶岩、变质岩等岩石中的一种副矿物, Th、U 含量高, U-Th-Pb 体系封闭温度高, 耐放射性损伤能力强, 初始普通 Pb 含量低, 对高分异花岗岩的测年可以获得较好的结果 (万渝生等, 2004; Williams et al., 2007; 吴黎光和李献华, 2020; 张雅等, 2021)。对同一花岗岩的对比测试表明, 采用独居石测年与锆石测年其年龄结果一致 (张雅等, 2021)。本次研究获得的海罗岭矿区云母锂辉石伟晶岩和碱性长石伟晶岩独居石 U-Pb 年龄分别为 141.68 ± 0.69 Ma 和 137.62 ± 0.73 Ma, 指示似伟晶岩的形成时间稍晚于中粒斑状黑云母二长花岗岩和中细粒黑云母二长花岗岩, 归属于早白垩世。这一时间, 也基本可以代表伟晶岩型锂矿的形成时代, 总体上伟晶岩形成过程持续

了约 4 Ma。本次研究在海罗岭矿区新发现早白垩世伟晶岩型锂矿, 这在赣南地区尚属首次, 这一发现为赣南地区锂矿找矿提供了新的方向。

与华南典型花岗岩型钽铌矿对比 (表 6), 海罗岭矿区稀有金属花岗岩成岩时代与宜丰白水洞、茜坑花岗岩型锂矿成矿时代 (140 Ma 左右) 较为接近, 但两者赋矿花岗岩体和主成矿元素明显不同, 海罗岭稀有金属矿化主要赋存在钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩中, 成矿元素以 Ta、Nb 为主, 伴生有 Li、Rb、Zr、Hf 等, 宜丰白水洞、茜坑矿床赋矿岩体为钠长石化中细粒白云母花岗岩, 其主成矿元素为 Li, 而 Ta、Nb 含量偏低 (周建廷等, 2011; 吴学敏等, 2016), 这可能为两者所处的构造环境和源区性质等因素不同所致。而海罗岭矿区内发育的钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩-中细粒黑云母二长花岗岩岩石组合, 拓宽了以往稀有金属主要赋存于燕山期复式岩体晚期二云母花岗岩-白云母花岗岩中的认识 (林德松, 1993; 李洁和黄小龙, 2013; 杨泽黎等, 2014; 徐喆等, 2018), 为赣南地区稀有金属找矿提供了新的思路。

海罗岭矿区稀有金属花岗岩成岩时代明显晚于赣西宜春 414 钽铌矿 (160~150 Ma)、广西栗木钽铌矿床 (219~214 Ma), 早于赣北横峰松树岗钽铌矿 (133~130 Ma)。与赣南地区大规模发育的钨矿对比, 其形成时代明显晚于赣南地区石英脉型钨矿成矿时代, 早于斑岩型锡矿的成矿时代。因此, 海罗岭矿区稀有金属成矿代表赣南地区一次独特的稀有金属成矿事件。在矿化类型上, 海罗岭矿区同时存在蚀变花岗岩型和花岗伟晶岩型两种, 表现为空间上紧密共生, 时间上接续而至的两阶段成矿作用。总体上, 赣南地区的这次稀有金属成矿与华南地区燕山中期第二阶段 W、Sn、Nb-Ta 等有色-稀有金属矿化为主的成矿作用时代 (约 150~139 Ma) (华仁民等, 2005) 基本一致, 属于该成矿阶段晚期的产物。

综上所述, 海罗岭矿区内稀有金属成矿作用复杂, 在同一矿区同时出现蚀变花岗岩和花岗伟晶岩两种稀有金属矿化类型, 拓宽了赣南地区稀有金属, 特别是锂矿的找矿思路。早白垩世稀有金属花岗岩成岩时代的精确厘定, 揭示了赣南地区 140 Ma 左右存在一次特殊的稀有金属成矿事件。厘定了钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩与钽铌矿密切相关的成矿专属性。今后赣南地区找矿勘查工作中, 需重点关注早白垩世钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩及相关似伟晶岩, 对已知钨

表 6 赣南地区 W、Sn、Ta-Nb 和 Li 矿床(点)主要类型、成岩成矿时代、成矿元素特征表

Table 6 Characteristics of W, Sn, Ta-Nb and Li deposits (points), diagenetic and metallogenic ages, and ore-forming elements in southern Jiangxi				
矿床	矿床类型	元素组合	成矿年龄 (Ma)	赋矿岩体及成岩年龄 (Ma)
石城海罗岭	蚀变花岗岩型	Nb-Ta-Li-Rb-Zr-Hf		141.9±1.1(中细粒黑云母二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄); 141.68±0.69 和 137.62±0.73(似伟晶岩 LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 年龄)
石城姜坑里	蚀变花岗岩型	Nb-Ta-Li-Rb-Cs		140.6(花岗岩 Rb-Sr 等时线)和 150(似伟晶岩 K-Ar 法)
广昌西港	花岗伟晶岩型	Li	420±4~424±5(铌钽铁矿 U-Pb)	许建祥等, 2001 [●] Che et al., 2019
宜春 414 钽铌矿	蚀变花岗岩型	Li-Nb-Ta-Rb-Cs	158±1(铌钽铁矿 U-Pb); 150.6±5.1(辉钼矿 Re-Os); 152.8±1.4(辉钼矿 Re-Os)	楼法生等, 2005; 杨泽黎等, 2014; 李胜虎, 2015; 张勇等, 2019; Che et al., 2019
宜丰白水洞、茜坑	蚀变花岗岩型	Li-Nb-Ta-Sn	144±5(铌钽矿 U-Pb)、 139.09±0.56(钨云母 Ar-Ar)	Xie et al., 2019; 聂晓亮等, 2022
横峰松树岗	蚀变花岗岩型	Nb-Ta-Li-W-Sn	130.0±2.0, 129.0±1.0(铌铁矿 U-Pb)	Che et al., 2019; Wang et al., 2018
横峰黄山	花岗伟晶岩型	Nb-Ta-Sn	130.0±1.0, 129.0±1.0(铌铁矿 U-Pb)	Che et al., 2019
广西栗木	蚀变花岗岩型	Li-Be-Nb-Ta-Sn	219.0±3.0, 217.0±2.0(铌铁矿 U-Pb); 214.1±1.9(云母 Ar-Ar 坪年龄)	杨锋等, 2009; Che et al., 2019
大余西华山	石英脉型	W-Mo-Be	157.8±0.9(辉钼矿 Re-Os); 152.8±1.6(白云母 Ar-Ar 坪年龄)	Hu et al., 2012
漂塘	石英脉型	W-Mo-Be	158.9±1.4(白云母 Ar-Ar 坪年龄); 152±1.9(白云母 Ar-Ar 等时线年龄)	刘善宝等, 2008; 张文兰等, 2009
荡坪	石英脉型	W-Mo-Be	157.4±1.6(含钨石英脉辉钼矿 Re-Os)	王登红等, 2010
全南大吉山	花岗岩型	W-Nb-Ta	144.4±0.5, 147.178±0.57(云母 Ar-Ar 年龄)	张文兰等, 2006
崇义九龙脑	花岗岩型	W-Mo-Bi-Cu-Be		郭春丽等, 2011
崇义淘锡坑	石英脉型	W	154.4±3.8(辉钼矿 Re-Os)	陈郑辉等, 2006; 郭春丽等, 2011
岗美山	石英脉型	W	153.7±1.5(含钨石英脉辉钼矿 Re-Os)	王登红等, 2010
画眉坳	石英脉型	W-Be-Bi-Mo	153.4±1.5(云母 Ar-Ar 坪年龄)	王登红等, 2010
会昌岩背	斑岩型	Sn-Cu-Ag	125.5±6.1(石英 Rb-Sr 等时线)	梅玉萍等, 2007

锡矿区外围或边深部的钠长石化叠加云英岩化的斑状黑云母二长花岗岩是新的重要找矿勘查方向。

6 结论

(1)海罗岭的稀有金属成矿作用具两阶段特征,早阶段以蚀变花岗岩型钽铌矿为主,赋存于钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩中,晚阶段则以花岗伟晶岩型锂矿为主,赋存于云母锂辉石伟晶岩中。矿区花岗岩蚀变普遍且强烈,经历了早期的钠长石化、白云母化、黄玉化,晚期的绢云母化、硅化等,呈现出碱性长石化到云英岩化的演化过程,其中钠长石化、白云母化与稀有金属成矿密切相关。

(2)海罗岭花岗岩具富硅、富碱、富铝,贫钛、镁的特征,钠长石化白云母化中粒斑状黑云母二长花岗岩(富钽花岗岩)富含挥发性组分 F, Nb/Ta 值、Zr/Hf 值和稀土总量极低,稀土元素具“四分组”效应,指示富钽花岗岩为岩浆-流体相互作用的产物。

(3)华南典型花岗岩型钽铌锂矿中 Li 矿化富集程度与 F 含量呈明显的正相关,与稀土总量、K/Rb 值呈负相关;Ta 矿化富集程度与 F 含量呈明显的正相关,与 Nb/Ta 值、Zr/Hf 值呈明显的负相关, Nb/Ta 值<2 可以作为形成钽矿化的良好标志, Nb/Ta 值<1 是形成工业钽矿的条件;富钽花岗岩中 K/Rb 值<40,富锂花岗岩中 K/Rb 值<20。

(4)海罗岭中细粒黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 141.9±1.1 Ma,云母锂辉石伟晶岩和碱性长石伟晶岩独居石 U-Pb 年龄分别为 141.68±0.69 Ma 和 137.62±0.73 Ma,赣南地区 140 Ma 左右可能存在一次特殊的稀有金属成矿事件。

致谢:本文是集体劳动的成果,衷心感谢在野外及室内工作中付出辛勤劳动的项目成员。衷心感谢审稿专家和编辑老师的悉心指导和辛勤付出!

注 释

- ① 许建祥,王淑敏,陈为光,朱宏新,等. 2001. 江西省石城县井坑里矿区钽铌矿详查地质报告. 内部成果报告, 4~48.
- ② 温珍连,邹新勇,何桂红,曾跃,唐高阳,等. 2008. 江西省石城县海罗岭钽铌矿区 640 米标高以上资源储量核实报告. 内部成果报告, 9~35.

References

Ballouard C, Poujol M, Boulvais P, Branquet Y, Tartèse R, Vigneresse J L. 2016. Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition. *Geology*, 44: 231~234.

Budzyń B, Sláma J, Corfu F, Crowley J, Schmitz M, Williams M L, Jercinovic M J, Kozub-Budzyń G A, Konečný P, Rzepa G, Włodek A. 2021. TS-Mnz—A new monazite age reference material for U-Th-Pb microanalysis. *Chemical Geology*, 572:

120~195.

Che X D, Wang R C, Wu F Y, Zhu Z Y, Zhang W L, Hu H, Xie L, Lu J J, Zhang D. 2019. Episodic Nb-Ta mineralization in South China: Constraints from in situ LA-ICP-MS columbite-tantalite U-Pb dating. *Ore Geology Reviews*, 105: 71~85.

Chen Jun, Lu Jianjun, Chen Weifeng, Wang Rucheng, Ma Dongsheng, Zhu Jinchu, Zhang Wenlan, JiJunfeng. 2008. W-Sn-Nb-Ta-bearing granites in the Nanling Range and their relationship to metallogengensis. *Geological Journal of China Universities*, 14 (4): 459 ~ 473 (in Chinese with English abstract).

Chen Zhenghui, Wang Denghong, Qu Wenjun, Chen Yuchuan, Wang Pingan, Xu Jianxiang, Zhang Jiajing, Xu Minlin. 2006. Geological characteristics and mineralization age of the Taotikong tungsten deposit in Chongyi County, southern Jiangxi Province, China. *Geological Bulletin of China*, (4): 496 ~501 (in Chinese with English abstract).

Cui Yuanyuan, Zhao Zhidan, Jiang Ting, Yang Jinbao, Ding Cong, Sheng Dan, Hou Qingye, Hu Zhaochu. 2013. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Early Paleozoic granitoids in southern Jiangxi Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 4011~4024 (in Chinese with English abstract).

Department of Geology. 1981. Nanjing University. Granitoids of Different Geological Periods and Their Metallogenetic Relations, South China. Beijing: Science Press, 1~382 (in Chinese).

Dickin A P, Muller R. 2005. Radiogenic isotope geology. *Physics Today*, 49(6): 60~60.

Dong Yecai, Ding Rufu. 2016. Restraint factors of geochemical characteristics and dynamic background of granite bodies in Limu ore field of Guangxi. *Mineral Resources and Geology*, 30 (6): 998~1005 (in Chinese with English abstract).

Fan Xianke. 2019. Study on metallogenic mechanism of the giant Dahutang tungsten polymetallic orefield in Jiangxi Province, China. PhD dissertation of Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese with English abstract).

Gonçalves G O, Lana C, Scholz R, Buick I S, Gerdes A, Kamo S L, Corfu F, Marinho M M, Chaves Ae O, Valeriano, Nalini H A. 2016. An assessment of monazite from the Itambé pegmatite district for use as U-Pb isotope reference material for microanalysis and implications for the origin of the “Moacyr” monazite. *Chemical Geology*, 424: 30~50.

Guo Chunli, Chen Yuchuan, Li Chuanbiao, Chen Zhenghui, Lou Fasheng. 2011. Zircon SHRIMP U-Pb dating, geochemistry, Sr-Nd isotopic analysis of the Late Jurassic granitoids in Jiulongnao W-Sn-Pb-Zn ore-concentrated areas in Jiangxi Province and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 85(7): 1188~1205 (in Chinese with English abstract).

Hou Zengqian, Chen Jun, Zhai Mingguo. 2020. Current status and frontiers of research on critical mineral resources. *Chinese Science Bulletin*, 65(33): 3651~3652 (in Chinese with English abstract).

Hu Lunyuan, Hou Shanshan, Liang Guoan. 2015. Study on the metallogenic regularity and prospecting direction in the Hailuoling tantalum-tin polymetallic ore field in Jiangxi. *Mineral Exploration*, 6(2): 132~141 (in Chinese with English abstract).

Hu R Z, Wei W F, Bi X W, Peng J T, Qi Y Q, Wu L Y, Chen Y W. 2012. Molybdenite Re-Os and muscovite ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of the Xihuashan tungsten deposit, central Nanling district, South China. *Lithos*, 150(Complete): 111~118.

Hu Weizheng, Huang Junping, Huang Xiaowen. 2005. Characteristics and genesis of pegmatite type Nb-Ta spodumene deposit in Xigang, South Jiangxi. *Resources Survey & Environment*, (4): 258~266 (in Chinese with English abstract).

Hu Weizheng, Huang Xiaowen, Xie Zhendong. 2006. Geological characteristics and prospect foreground of spodumene deposits in Xigang-Langjing area, South Jiangxi Province. *Journal of East China Institute of Technology*, (S1): 187 ~ 194 (in

- Chinese with English abstract).
- Hu Z C, Zhang W, Liu Y S, Gao S, Li M, Zong K Q, Chen H H, Hu S H. 2015. "Wave" signal-smoothing and mercury-removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICPMS analysis: Application to lead isotope analysis. *Analytical Chemistry*, 87(2): 1152~1157.
- Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, Lu Jianjun. 2005. Three major metallogenic events in Mesozoic in South China. *Mineral Deposits*, 24(2): 99~107 (in Chinese with English abstract).
- Huang Xiaolong, Wang Rucheng, Chen Xiaoming, Chen Peirong, Liu Changshi. 1998. Contrast between the high-P subtype and low-P subtype of F-rich granites in South China. *Geological Review*, 44(6): 607~617 (in Chinese with English abstract).
- Huang X L, Wang R C, Chen X M, Hu H, Liu C S. 2002. Vertical variations in the mineralogy of the Yichun topaz lepidolite granite, Jiangxi Province, southern China. *The Canadian Mineralogist*, 40: 1047~1068.
- Irber W. 1999. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3-4): 489~508.
- Jiang Shaoyong, Wang Chunlong, Zhang Lu, Yuan Feng, Su Huimin, Zhang Haoxiang, Liu Tao. 2021. In situ trace element tracing and isotopic dating of pegmatite type lithium deposits: An overview. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 3017~3038 (in Chinese with English abstract).
- Li Fuchun, Zhu Jinchu, Jin Zhandong, Li Xiaofeng. 2000. Formation mechanism of snowball texture in albite granite. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(1): 27~35 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Liu Xifang, Wang Denghong. 2014. The metallogenetic regularity of lithium deposit in China. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2269~2283 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Li Peng, Wang Denghong, Li Xingjie. 2019. A review of niobium and tantalum metallogenetic regularity in China. *Chinese Science Bulletin*, 64(15): 1545~1566 (in Chinese with English abstract).
- Li Jie, Huang Xiaolong. 2013. Mechanism of Ta-Nb enrichment and magmatic evolution in the Yashan granites, Jiangxi Province, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4311~4322 (in Chinese with English abstract).
- Li Qijin. 1986. Further recognition of 414 tantalum-bearing granite deposit. *Mineral Resources and Geology*, (2): 12~24 (in Chinese).
- Li Renze, Zhou Zhengbing, Peng Bo, Chen Jun, Wu Jianbo, Yu Huiqiang, Wan Jianjun, Yang Shuang. 2020. A discussion on geological characteristics and genetic mechanism of Dagang superlarge lithium-bearing porcelain stone deposit in Yifeng County, Jiangxi Province. *Mineral Deposits*, 39(6): 1015~1029 (in Chinese with English abstract).
- Li Shenghu. 2015. Ore-forming mechanisms and prospecting models of typical granite type rare metal deposits in South China. PhD dissertation of China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Lin Desong. 1978. Application of potassium-rubidium ratio in the study of genesis of some rocks and ore deposits. *Geology and Exploration*, (6): 45~48 (in Chinese).
- Lin Desong. 1993. Comparison study of the 414 ore deposit with Limu orefield. *Mineral Resources and Geology*, (4): 262~266 (in Chinese with English abstract).
- Lin Desong. 1996. Tantalum-rich Granite Type Deposits in South China. Beijing: Geological Publishing House, 1~147 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shanbao, Wang Denghong, Chen Yuchuan, Li Jiankang, Ying Lijuan, Xu Jianxiang, Zeng Zailin. 2008. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of muscovite from different types tungsten bearing quartz veins in the Chong-Yu-You concentrated mineral area in Gannan region and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 932~940 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G, Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1-2): 34~43.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q, Wang D B. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537~571.
- Lou Fasheng, Shen Weizhou, Wang Dezi, Shu Liangshu, Wu Fujiang, Zhang Fangrong, Yu Jinhai. 2005. Zircon U-Pb isotopic chronology of the Wugongshan dome compound granite in Jiangxi Province. *Acta Geologica Sinica*, 79(5): 636~644 (in Chinese with English abstract).
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635~643.
- Mei Yuping, Li Huaqin, Wang Denghong, Lu Yuanfa, Yang Hongmei, Xu Jianxiang, Zhang Jiajing. 2007. Rock-forming and ore-forming ages of the Yanbei porphyry tin deposit in Jiangxi Province and their geological significance. *Acta Geoscientia Sinica*, (5): 456~461 (in Chinese with English abstract).
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth Science Reviews*, 37(3-4): 215~224.
- Nie Xiaoliang, Wang Shuilong, Liu Shuang, Xu Lin. 2022. Geological and geochemical characteristics of Xikeng lithium deposit and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of lepidolite, Jiangxi Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 42(3): 285~294 (in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu, Zhu Wenbin, Xu Zhiqin. 2021. Geological settings and metallogenetic conditions of the granite-type lithium ore deposits in South China. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 3099~3114 (in Chinese with English abstract).
- Sláma J, Košler J, Condon D J, Crowley J L, Gerdes A, Hanchar J M, Horstwood M S A, Morris G A, Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett M N, Whitehouse M J. 2008. Plešovice zircon—A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1-2): 1~35.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313~345.
- Wan Yusheng, Liu Dunyi, Jian Ping. 2004. Comparison of SHRIMP U-Pb dating of monazite and zircon. *Chinese Science Bulletin*, 49(12): 1185~1190 (in Chinese).
- Wang C, Zhao X, Huang Z, Xing G, Wang L. 2018. Early Cretaceous extensional-tectonism-related petrology of the Gan-Hang Belt SE China: Lingshan A-type granite at ca. 130 Ma. *Geological Journal*, 53(6): 2487~2506.
- Wang Denghong. 2019. Study on critical mineral resources: significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1189~1209 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Chen Zhenhui, Chen Yuchuan, Tang Juxing, Li Jiankang, Ying Lijuan, Wang Chenghui, Liu Shanbao, Li Lixing, Qin Yan, Li Huanqin, Qu Wenjun, Wang Yanbin, Chen Wen, Zhang Yan. 2010. New data of the rock-forming and ore-forming chronology for China's important mineral resources areas. *Acta Geologica Sinica*, 84(7): 1030~1040 (in Chinese with English abstract).
- Wang Rucheng, Che Xudong, Wu Bin, Xie Lei. 2020. Critical mineral resources of Nb, Ta, Zr, and Hf in China. *Chinese Science Bulletin*, 65(33): 3763~3777 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Wang Yurong, Li Jiatian, Lu Jialan, Fan Wenling. 1979. Geochemical mechanism of Nb-, Ta-mineralization during the late stage of granite crystallization. *Geochimica*, (4): 283~291 (in Chinese with English abstract).
- Wiedenbeck M, Hanchar J M, Peck W H, Sylvester P, Valley J, Whitehouse M, Kronz A, Morishita Y, Nasdala L, Fiebig J, Franchi I, Girard J P, Greenwood R C, Hinton R, Kita N, Mason P R D, Norman M, Skår Ø, Spicuzza M J, Terada K, Tindle A, Togashi S, Vennemann T, Xie Q, Zheng Y F. 2004. Further characterization of the 91500 zircon crystal. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(1): 9~39.
- Williams M L, Jercinovic M J, Hetherington C J. 2007. Microprobe monazite geochronology: Understanding geologic processes by integrating composition and chronology. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 35(1): 137~175.
- Wu Liguang, Li Xianhua. 2020. Isotopic and elemental microanalyses of monazite and its geological application. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 39(6): 1077~1094 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xuemin, Zhou Minjuan, Luo Xicheng, Zhou Jianting. 2016. The metallogenic conditions and prospecting potential of lithium and rare metals in northwestern Jiangxi. *East China Geology*, 37(4): 275~283 (in Chinese with English abstract).
- Xie L, Liu Y, Wang R, Hu H, Che X, Xiang L. 2019. Li-Nb-Ta mineralization in the Jurassic Yifeng granite-aplite intrusion within the Neoproterozoic Jiuling batholith, South China: A fluid-rich and quenching ore-forming process. *Journal of Asian Earth Sciences*, 185: 104047.
- Xiong Xiaolin, Zhu Jinchu, Rao Bing. 1996. Mineral equilibria in Ta-Nb granite and petrologic applications. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 32(1): 100~105 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Xiaolin, Zhu Jinchu, Rao Bing, Lai Mingyuan. 1999. Phase relations in the albite granite H₂O-HF system and the genesis of topaz-bearing granitic rocks. *Geological Review*, 45(3): 313~322 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Xiaolin, Rao Bing, Zhu Jinchu, Zhao Zhenhua, Wang Xianjue. 2002. Fractional crystallization of a protolithionite granitic magma and the formation mechanism of albite granitic melt. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 223~230 (in Chinese with English abstract).
- Xu Keqin, Hu Shouxi, Sun Mingzhi, Ye Jun. 1982. On the two genetic series of granites in southeastern China and their metallogenetic characteristics. *Mineral Deposits*, (2): 1~14 (in Chinese with English abstract).
- Xu Keqin, Hu Shouxi, Sun Mingzhi, Zhang Jingrong, Ye Jun. 1983. On the genetic series of granites, as exemplified by the Mesozoic granites of South China. *Acta Geologica Sinica*, (2): 107~118 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhe, Wang Diwen, Wu Zhengchang, Fu Haiming, Liu Qinghong, Liu Yang, Huang Xinsu. 2018. Geological characteristics and genesis of the Yashan niobium-tantalum deposit at Yichun, Jiangxi Province. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 41(4): 364~378 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhe, Zhang Yong, Pan Jiayong, Zhang Fushen, Xia Fei, Wu Zhengchang, Han Shanchu, Liu Guoqi, Zhong Fujun, Zhang Xiaotian, Liu Yin, Yan Jie, Zhang Fangrong. 2023. In situ LA-ICP-MS analyses of muscovite: Constraints on granite-type Li mineralization in northwestern Jiangxi, South China. *Ore Geology Reviews*, 156: 105402.
- Xu Zhigang, Chen Yuchuan, Wang Denghong, Chen Zhenghui, Li Houmin. 2008. Scheme of the Classification of the Minerogenetic Units in China. Beijing: Geological Publishing House, 1~138 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Wang Rucheng, Zhao Zhongbao, Fu Xiaofang. 2018. On the structural backgrounds of the largescale "Hard Rock Type" lithium ore belts in China. *Acta Geologica Sinica*, 92(6): 1091~1106 (in Chinese with English abstract).
- Yang Feng, Li Xiaofeng, Feng Zuohai, Bai Yanping. 2009. ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of muscovite from greisenized granite and geological significance in Limu tin deposit. *Journal of Guilin University of Technology*, 29(1): 21~24 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zeli, Qiu Jiansheng, Xing Guangfu, Yu Minggang, Zhao Jiaolong. 2014. Petrogenesis and magmatic evolution of the Yashan granite pluton in Yichun, Jiangxi Province, and their constraints on mineralization. *Acta Geologica Sinica*, 88(5): 850~868 (in Chinese with English abstract).
- Yin L, Pollard P J, Hu S X, Taylor R G. 1995. Geologic and geochemical characteristics of the Yichun Ta-Nb-Li deposit, Jiangxi Province, South China. *Economic Geology*, 90: 577~585.
- Zaraisky G P, Aksyuk A M, Devyatova V N, Udoratina O V, Chevychelov Y V. 2008. Zr/Hf ratio as an indicator of fractionation of rare-metal granites by the example of the Kukulber Complex, Eastern Transbaikalia. *Journal of Petrology*, 16(7): 710~736.
- Zhang Wenlan, Hua Renmin, Wang Rucheng, Chen Peirong, Li Huimin. 2006. New dating of the Dajishan granite and related tungsten mineralization in southern Jiangxi. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 956~962 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenlan, Hua Renmin, Wang Rucheng, Li Huimin, Qu Wenjun, Ji Jianqing. 2009. New dating of the Piaotang granite and related tungsten mineralization. *Acta Geologica Sinica*, 83(5): 659~670 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ya, Li Quanzhong, Yan Jun, Xie Jiancheng, Yang Qingliang, Gao Ling. 2021. Analytical conditions for U-Th-Pb dating of monazite by LA-ICP-MS. *Rock and Mineral Analysis*, 40(5): 637~649 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yong, Ma Dongsheng, Xu Zhe, Zhao Haibo, Zhu Likuan. 2019. Yashan 414 tantalum-lithium ore molybdenite rhenium-osmium age and prospecting significance. *Abstract Collection of Papers of the Ninth National Symposium on Metallogenic Theory and Prospecting Methods*, 199~200 (in Chinese).
- Zhao Zhenhua, Akimasa Masuda, Shabani M B. 1992. Tetrad effects of rare-earth elements in rare-metal granites. *Geochimica*, (3): 221~233 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jianting, Wang Guobin, He Shufang, Fan Aichun. 2011. Diagenesis and mineralization of Ganfang rock in Yifeng, Jiangxi Province. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 34(4): 345~351+358 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jinchu, Zhang Peihua, Rao Bing, Li Fuchun, Xiong Xiaolin. 2002. Anatomy and inspiration of Yichun rare metal granite and Keketuohai rare metal pegmatite. *Mineral Deposits*, 21(S1): 841~844 (in Chinese).
- Zhu Z Y, Wang R C, Che X D, Zhu J C, Wei X L, Huang X E. 2015. Magmatic-hydrothermal rare-element mineralization in the Songshugang granite (northeastern Jiangxi, China): Insights from an electron-microprobe study of Nb-Ta-Zr minerals. *Ore Geology Reviews*, 65: 749~760.

参 考 文 献

- 陈骏, 陆建军, 陈卫锋, 王汝成, 马东升, 朱金初, 张文兰, 季峻峰. 2008. 南岭地区钨锡铌钽花岗岩及其成矿作用. *高校地质学报*, 14(4): 459~473.
- 陈郑辉, 王登红, 屈文俊, 陈毓川, 王平安, 许建祥, 张家菁, 许敏林. 2006. 赣南崇义地区钨锡钨矿的地质特征与成矿时代. *地质通报*, (4): 496~501.
- 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. *岩石学报*, 29(11): 4011~4024.
- 董业才, 丁汝福. 2016. 广西栗木矿田花岗岩体地球化学特征制约因素及其动力学背景. *矿产与地质*, 30(6): 998~1005.
- 樊献科. 2019. 江西大湖塘超大型钨多金属矿田成矿机制研究. 中

- 国地质科学院博士学位论文, 1~194.
- 郭春丽, 陈毓川, 黎传标, 陈郑辉, 楼法生. 2011. 赣南晚侏罗世九龙脑钨锡铅锌矿集区不同成矿类型花岗岩年龄、地球化学特征对比及其地质意义. 地质学报, 85(7): 1188~1205.
- 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. 科学通报, 65(33): 3651~3652.
- 胡论元, 侯珊珊, 梁国安. 2015. 江西海罗岭钨锡多金属矿田成矿规律及找矿方向探讨. 矿产勘查, 6(2): 132~141.
- 胡为正, 黄俊平, 黄孝文. 2005. 赣南西港伟晶岩型钽铌辉石矿床地质特征及成因. 资源调查与环境, (4): 258~266.
- 胡为正, 黄孝文, 谢振东. 2006. 赣南西港—冷井地区锂辉石矿床地质特征及找矿前景. 东华理工学院学报, (S1): 187~194.
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 陆建军. 2005. 论华南地区中生代 3 次大规模成矿作用. 矿床地质, (2): 99~107.
- 黄小龙, 王汝成, 陈小明, 陈培荣, 刘昌实. 1998. 华南富氟花岗岩高磷和低磷亚类型对比. 地质评论, 44(6): 607~617.
- 蒋少涌, 王春龙, 张璐, 袁峰, 苏慧敏, 张浩翔, 刘涛. 2021. 伟晶岩型锂矿中矿物原位微区元素和同位素示踪与定年研究进展. 地质学报, 95(10): 3017~3038.
- 李福春, 朱金初, 金章东, 李晓峰. 2000. 钠长石花岗岩中雪球结构形成机理的研究. 岩石矿物学杂志, 19(1): 27~35.
- 李建康, 刘喜方, 王登红. 2014. 中国锂矿成矿规律概要. 地质学报, 88(12): 2269~2283.
- 李建康, 李鹏, 王登红, 李兴杰. 2019. 中国钽铌矿成矿规律. 科学通报, 64(15): 1545~1566.
- 李洁, 黄小龙. 2013. 江西雅山花岗岩岩浆演化及其 Ta-Nb 富集机制. 岩石学报, 29(12): 4311~4322.
- 李启津. 1986. 对 414 含钽花岗岩矿床的再认识. 矿产与地质, (2): 12~24.
- 李仁泽, 周正兵, 彭波, 陈骏, 吴建波, 余会强, 万建军, 杨爽. 2020. 江西宜丰县大港超大型含锂瓷石矿床地质特征及成因机制探讨. 矿床地质, 39(6): 1015~1029.
- 李胜虎. 2015. 华南典型花岗岩型稀有金属矿床的成矿机制与找矿模式研究. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 1~160.
- 林德松. 1978. 钾、铷比值在研究某些岩石和矿床成因中的应用. 地质与勘探, (6): 45~48.
- 林德松. 1993. 414 矿床和栗木矿田的对比特征研究. 矿产与地质, (4): 262~266.
- 林德松 1996. 华南富钽花岗岩矿床. 北京: 地质出版社, 1~147.
- 刘善宝, 王登红, 陈毓川, 李建康, 应立娟, 许建祥, 曾载淋. 2008. 赣南崇义—大余—上犹矿集区不同类型含石英中白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄及其地质意义. 地质学报, 82(7): 932~940.
- 楼法生, 沈渭洲, 王德滋, 舒良树, 吴富江, 张芳荣, 于津海. 2005. 江西武功山穹隆复式花岗岩的锆石 U-Pb 年代学研究. 地质学报, 39(5): 636~644.
- 梅玉萍, 李华芹, 王登红, 路远发, 杨红梅, 许建祥, 张家菁. 2007. 江西岩背斑岩锡矿的成岩成矿时代及其地质意义. 地球学报, (5): 456~461.
- 南京大学地质学系. 1981. 华南不同时代花岗岩类及其与成矿关系. 北京: 科学出版社, 1~382.
- 聂晓亮, 王水龙, 刘爽, 徐林. 2022. 江西茜坑锂矿床地质地球化学特征与锂云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学研究. 矿物学报, 42(3): 285~294.
- 舒良树, 朱文斌, 许志琴. 2021. 华南花岗岩型锂矿地质背景与成矿条件. 地质学报, 95(10): 3099~3114.
- 万渝生, 刘敦一, 简平. 2004. 独居石和锆石 SHRIMP U-Pb 定年对比. 科学通报, 49(12): 1185~1190.
- 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. 地质学报, 93(6): 1189~1209.
- 王登红, 陈郑辉, 陈毓川, 唐菊兴, 李建康, 应立娟, 王成辉, 刘善宝, 李立兴, 秦燕, 李华芹, 屈文俊, 王彦斌, 陈文, 张彦. 2010. 我国重要矿产地成岩成矿年代学研究新数据. 地质学报, 84(7): 1030~1040.
- 王汝成, 车旭东, 郭斌, 谢磊. 2020. 中国钽钼锆铪资源. 科学通报, 65(33): 3763~3777.
- 王玉荣, 李加田, 卢家烂, 樊文苓. 1979. 花岗岩浆结晶过程晚期钽、钼富集成矿的地球化学机理探讨. 地球化学, (4): 283~291.
- 吴黎光, 李献华. 2020. 独居石微区同位素和元素分析及地质应用. 矿物岩石地球化学通报, 39(6): 1077~1094.
- 吴学敏, 周敏娟, 罗喜成, 周建廷. 2016. 江西西北部锂及稀有金属成矿条件及找矿潜力分析. 华东地质, 37(4): 275~283.
- 熊小林, 朱金初, 饶冰. 1996. Ta、Nb 花岗岩的矿物平衡及岩石成因. 南京大学学报(自然科学版), 32(1): 100~105.
- 熊小林, 朱金初, 饶冰, 赖鸣远. 1999. 钠长花岗岩-H₂O-HF 体系相关性及含黄玉花岗岩质岩石的成因. 地质评论, 45(3): 313~322.
- 熊小林, 饶冰, 朱金初, 赵振华, 王贤觉. 2002. 黑鳞云母花岗质岩浆的结晶分异及钠长花岗质岩浆的形成. 岩石学报, 18(2): 223~230.
- 徐克勤, 胡受奚, 孙明志, 叶俊. 1982. 华南两个成因系列花岗岩及其成矿特征. 矿床地质, (2): 1~14.
- 徐克勤, 胡受奚, 孙明志, 张景荣, 叶俊. 1983. 论花岗岩的成因系列——以华南中生代花岗岩为例. 地质学报, (2): 107~118.
- 徐喆, 王迪文, 吴正昌, 符海明, 刘庆宏, 刘杨, 黄新曙. 2018. 江西宜春雅山地区钽铌矿床地质特征及成因探讨. 东华理工大学学报(自然科学版), 41(4): 364~378.
- 徐志刚, 陈毓川, 王登红, 陈郑辉, 李厚民. 2008. 中国成矿区带划分方案. 北京: 地质出版社, 1~138.
- 许志琴, 王汝成, 赵中宝, 付小方. 2018. 试论中国大陆“硬岩型”大型锂矿带的构造背景. 地质学报, 92(6): 1091~1106.
- 杨锋, 李晓峰, 冯佐海, 白艳萍. 2009. 栗木锡矿云英岩化花岗岩白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄及其地质意义. 桂林理工大学学报, 29(1): 21~24.
- 杨泽黎, 邱检生, 邢光福, 余明刚, 赵蛟龙. 2014. 江西宜春雅山花岗岩体的成因与演化及其对成矿的制约. 地质学报, 88(5): 850~868.
- 张文兰, 华仁民, 王汝成, 陈培荣, 李惠民. 2006. 赣南大吉山花岗岩成岩与钨矿成矿年龄的研究. 地质学报, 80(7): 956~962.
- 张文兰, 华仁民, 王汝成, 李惠民, 屈文俊, 李建清. 2009. 赣南漂塘钨花岗岩成岩年龄与成矿年龄的精确测定. 地质学报, 83(5): 659~670.
- 张雅, 李全忠, 闫峻, 谢建成, 杨青亮, 高玲. 2021. LA-ICP-MS 独居石 U-Th-Pb 测年方法研究. 岩矿测试, 40(5): 637~649.
- 张勇, 马东升, 徐喆, 赵海波, 朱黎宽. 2019. 雅山 414 钽锂矿辉钼矿铼钨年龄及找矿意义. 第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集, 199~200.
- 赵振华, 增田彰正, 夏巴尼 M B. 1992. 稀有金属花岗岩的稀土元素四分组效应. 地球化学, (3): 221~233.
- 中国矿产地质志·江西卷编委会. 2015. 中国矿产地质志·江西卷. 北京: 地质出版社, 1~1351.
- 周建廷, 王国斌, 何淑芳, 范爱春. 2011. 江西宜丰地区甘坊岩体成岩成矿作用分析. 东华理工大学学报(自然科学版), 34(4): 345~351+358.
- 朱金初, 张佩华, 饶冰, 李福春, 熊小林. 2002. 宜春稀有矿化花岗岩与可可托海稀有矿化伟晶岩的异同剖析和启迪. 矿床地质, 21(S1): 841~844.

**Petrogeochemical and geochronological characteristics of Hailuoling
granite-type niobium-tantalum deposit in Shicheng,
Jiangxi Province and its geological significance**

XU Zhe^{1, 2)}, ZHANG Yong^{* 1, 5)}, PAN Jiayong¹⁾, ZHANG Fangrong²⁾, LOU Fasheng³⁾,
PENG Linlin⁴⁾, ZHOU Yu²⁾, HE Bin²⁾

1) *State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China*; 2) *Institute of Basic Geological Survey, Jiangxi Geological Survey and Exploration Institute, Nanchang, Jiangxi 330030, China*; 3) *Jiangxi Geological Survey and Exploration Institute, Nanchang, Jiangxi 330009, China*;

4) *Jiangxi Geological Bureau, Nanchang, Jiangxi 330036, China*; 5) *Geological Survey and Research Institute, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China*

** Corresponding author: zhycy2004@163.com*

Abstract

The granite-type rare metal deposits are Jiangxi Province's most advantageous mineral resources. These deposits are mainly found in the province's western and northern regions, with Yichun 414 super-large Ta-Nb deposit serving as a representative. There have been no reports of rare metal deposits associated with the Yanshanian granite type in the widely dispersed granite of southern Jiangxi. We conducted a detailed examination of granite petrology, rock geochemistry, and isotope chronology in our focused study on the Hailuoling Nb-Ta deposit in Shicheng County, southern Jiangxi Province. The rock association in Hailuoling of medium grained porphyritic biotite monzonite granite and medium fine grained biotite monzonite granite has been determined, and the metallogenic specificity of the medium grained porphyritic biotite monzonite granite with albite superimposed muscovite, which is closely related to the niobium tantalite deposit, has been clarified. The mineralization of the Hailuoling Nb-Ta deposit was divided into two stages: the first stage was dominated by altered granite Ta-Nb ore, which was discovered in albitized muscovite medium-grained porphyritic biotite monzogranite, and the second stage was characterized by granite pegmatite type Li ore, which was discovered in mica spodumene pegmatite. The granite from the Hailuoling Nb-Ta deposit experienced a variety of alteration processes, including alkaline feldsparization and mica quartzitization. The granite of the Hailuoling Nb-Ta deposit is rich in silicon, alkali, aluminum, titanium, and magnesium. Furthermore, the albitized muscovite medium-grained porphyritic biotite monzogranite (a tantalum-rich granite) has a fluorine content ranging from 8330×10^{-6} to 13076×10^{-6} , with a mean of 10475×10^{-6} . There were very low Nb/Ta and Zr/Hf values, as well as very low whole rare earth concentration. This study found a substantial positive link between the degree of Ta mineralization enrichment and fluorine content, but a significant negative correlation between Nb/Ta and Zr/Hf values. Similarly, enrichment of Li mineralization is correlated with fluorine content but negatively correlated with overall rare earth content and K/Rb value. U-Pb dates of zircon in medium-fine-grained biotite monzogranite were estimated at 141.9 ± 1.1 Ma, while early Cretaceous ages of mica spodumene pegmatite and alkali feldspar pegmatite monazite were 141.68 ± 0.69 Ma and 137.62 ± 0.73 Ma, respectively. This study reveals a distinct Nb-Ta metallogenic event associated with albitization and subsequent muscovitization of medium-grained porphyry biotite monzogranite, as well as a Li metallogenic event associated with granite pegmatite in the southern Jiangxi area about 140 Ma. This discovery broadens the prospecting technique and points in a new avenue for the exploration of rare metals in southern Jiangxi and probably across South China. It calls into question the widely held idea that rare metals in South China are mostly found in the late stages of the Yanshanian granite complex of mica-muscovite granite.

Key words: rare metals; niobium tantalum lithium; geochemistry; isotopic age; Hailuoling, southern Jiangxi