

# 桂东南——稀有金属伟晶岩的重要富集地区

胡托成

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2023年3月26日; 录用日期: 2023年5月10日; 发布日期: 2023年5月18日

## 摘要

稀有金属资源是我国各类高新技术产业的重中之重, 为了摆脱这些资源被其他国家的限制, 加强稀有金属找矿是我们地质工作者目前需加紧解决的问题, 与稀有金属矿化密切相关的伟晶岩是我们需要重点关注的类型。伟晶岩稀有金属矿床中的矿物复杂多样, 主要是由于复杂的岩浆期后热液作用, 以及不同阶段成矿流体成分和温度的差异导致的。主要有两种模式: 1、花岗质岩浆演化后期富挥发分( $H_2O$ 、F等)的残余熔体沿裂隙贯入到相对封闭的围岩中结晶而成赋矿伟晶岩; 2、超变质的深熔作用或选择重熔作用形成的深熔流体对固态岩石发生重结晶作用及交代作用或沿构造裂隙贯入而形成伟晶岩脉。在成矿地质背景上, 伟晶岩型稀有金属矿床的形成通常与造山作用密切相关。桂东南地区地处华南板块西南部, 正处于华夏地块和扬子地块的交接部位, 碰撞造山作用导致的构造-岩浆作用活跃, 是广西乃至华南地区一个重要的有色金属成矿带, 同时也是一个重要的新兴矿产成矿区。稀有金属广泛地分布在桂东南地区, 此类矿种的发育与博白、北流、容县一带大面积出露的高度演化的花岗岩体中分异出来的伟晶岩有关, 出现伟晶岩型稀有金属矿化。主要赋存于桂南晚志留世宁潭超单元及其外接触带中。区内伟晶岩发育集中区主要有4处, 1、桂东地区容县伟晶岩群, 2、云开地区石垌伟晶岩群, 3、云开地区双旺伟晶岩群, 4、云开地区北流六靖伟晶岩群。可以预见, 这些伟晶岩中蕴藏了丰富的稀有金属资源, 亟待我们去勘察开发。

## 关键词

稀有金属, 伟晶岩, 桂东南

# Southeast Guangxi: An Important Enrichment Area of Rare Metal Pegmatite

Tuocheng Hu

School of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Mar. 26<sup>th</sup>, 2023; accepted: May 10<sup>th</sup>, 2023; published: May 18<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Rare metal resources are the top priority of various high-tech industries in China. In order to break away from the constraints of these resources by other countries, strengthening the explora-

tion of rare metals is a problem that our geologists need to urgently address. Pegmatite, which is closely related to rare metal mineralization, is a type that we need to focus on. The complexity and diversity of minerals in pegmatite rare metal deposits are mainly due to complex post magmatic hydrothermal processes, as well as differences in the composition and temperature of ore-forming fluids at different stages. There are two main modes: 1. The residual melt rich in volatiles ( $H_2O$ , F, etc.) in the late stage of the evolution of granitic magma penetrates along the fractures into relatively closed surrounding rocks and crystallizes into ore-bearing pegmatite; 2. Hypermetamorphic deep melting or selective remelting formed deep melting fluids recrystallize and metasomatize solid rocks or penetrate along structural fractures to form pegmatite veins. In the metallogenic geological setting, the formation of pegmatite type rare metal deposits is usually closely related to orogeny. Southeast Guangxi is located in the southwest of the South China Plate, at the junction of the Cathaysian and Yangtze blocks. Tectonic magmatism caused by collision orogeny is active, making it an important nonferrous metal metallogenic belt in Guangxi and even South China, as well as an important emerging mineral metallogenic area. Rare metals are widely distributed in southeastern Guangxi, and the development of such minerals is related to pegmatite differentiated from highly evolved granite outcrops in a large area in the areas of Bobai, Beiliu, and Rongxian, resulting in pegmatite type rare metal mineralization. It mainly occurs in the Late Silurian Ningtansuperunit and its outer contact zone in southern Guangxi. There are mainly four areas where pegmatite development is concentrated, namely, the Tanrong pegmatite group in Eastern Guangxi, the Shidong pegmatite group in Yunkai, and the Shuangwang pegmatite group in Yunkai, BeiliuLiujiang pegmatite group in Yunkai area. It can be predicted that these pegmatites contain abundant rare metal resources, which urgently require our exploration and development.

## Keywords

Rare Metals, Pegmatite, Southeast Guangxi

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

稀有金属(Li-Be-Nb-Ta-Rb-Cs)是我国战略性新兴产业的关键性矿产资源,在高科技方面起到了重要用途,在冶金、航空航天、轻工业、石油化工、电子信息、特种材料及医疗等传统工业领域广泛运用,尤其是在高端装备制造业特别是芯片和新能源汽车等领域均发挥着不可替代的作用,其重要性对各国的科技发展来说日益突显[1] [2] [3]。美国总统特朗普在 2017 年专门签发行政命令确保稀有金属的安全供应为联邦战略,欧盟前些年也已经将稀有金属列为关键矿产清单之中。自 2011 年起,中国地质调查局率先设立了“全国三稀金属战略研究”、“我国三稀矿产调查研究”、“大宗急缺矿产和战略性新兴产业矿产调查”等项目和工程,引领了全国性三稀矿产调查研究的新高潮,在 2016 年发布的《全国矿产资源规划 2016~2020 年》报告中我国也将稀有金属矿产列为 24 种战略性矿产。然而,我国这些关键金属探明储量和产量少,对外依存度高,已成为我国亟需且紧缺的战略性关键矿产资源[4] [5]。由于稀有金属在高科技方面的重要用途,导致全球对其进入新一轮研究高潮,我国率先部署调查研究,由于资金和人力资源加大投入,找矿成果斐然。

伟晶岩矿床作为稀有金属的重要来源之一,在矿床学上占有不可忽视的地位,也是国内外学者研究的重点[6]-[11]。在近年来的勘查中,虽然涌现了一大批重要的稀有金属矿床,如四川甲基卡超大型伟晶岩型锂矿床、湖南幕阜山超大型铌-钽矿、西昆仑大红柳滩伟晶岩型锂矿床[1] [12] [13]等,但是远不能满足国家和社会发展需求,此外,稀有金属在伟晶岩中富集成因制约着矿床的勘查工作。因此,加强国内这类伟



岩矿床，矿产储量位于世界前列，其中蕴藏了丰富的稀有金属矿产甚至放射性金属资源。

伟晶岩的形成经历了复杂的演化过程，前人主要总结为花岗质岩浆结晶分异和变沉积岩部分熔融两种形式。实验岩石学研究表明，热液流体中的挥发份( $H_2O$  和  $F$  等)对稀有金属元素的迁移和富集也起着重要的作用[8] [39] [40]。稀有金属元素可与  $F$  等元素以易溶络合物的形式赋存在成矿流体中。由于  $F$  等元素挥发分密度较低，在岩浆侵位过程中能快速迁移至岩体顶部并大量聚集， $F$  与稀有元素组成的络合物一起迁移和富集，随温度压力的降低，残余熔体的性质发生了变化，稳定性降低，导致稀有金属络合物溶解度降低并发生水解、沉淀并富集形成矿床[41]。因此，富含挥发组分的含稀有金属矿物的伟晶岩带通常分布在岩体最上方或最外侧。

自上个世纪以来，地质工作者对伟晶岩进行了岩石学、地球化学、流体包裹体、同位素等方面详细

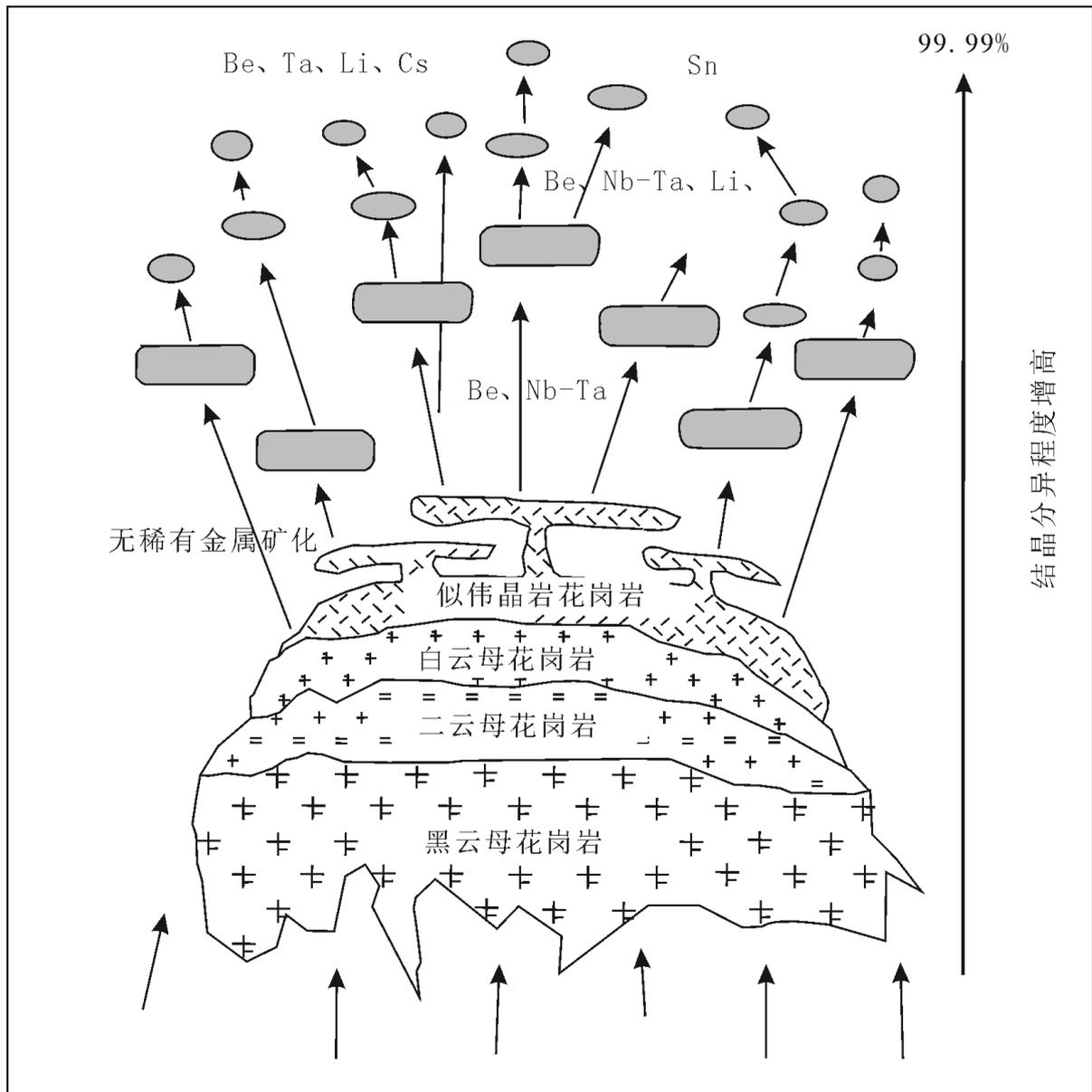


Figure 2. Pegmatite formation model (Shearer, 1992 [50])

图 2. 伟晶岩形成模式图(Sheaer, 1992 [50])

的研究,总结出伟晶岩稀有金属矿床的成因和成矿作用的主要因素,即伟晶岩的稀有金属成矿作用是地壳源区(熔体的产生)和局部演化(独特的物理化学成矿作用)联合作用的结果(图 2)。主要有两种模式:1、花岗质岩浆演化后期富挥发分( $H_2O$ 、F 等)的残余熔体沿裂隙贯入到相对封闭的围岩中结晶而成赋矿伟晶岩[42] [43]; 2、超变质的深熔作用或选择重熔作用形成的深熔流体对固态岩石发生重结晶作用及交代作用或沿构造裂隙贯入而形成伟晶岩脉[44] [45]。

在成矿地质背景上,伟晶岩型稀有金属矿床的形成通常与造山作用密切相关,一般形成于造山运动之后的相对宁静的时期[9]。因为在造山强烈阶段,稀有金属由于缺乏稳定的环境而得不到充分有效的聚集,到了造山之后的相对稳定阶段才有了安定的环境和有利于充分结晶分异的时空条件,形成超大型矿床[9]。

伟晶岩稀有金属矿床中的矿物复杂多样,主要是由于复杂的岩浆期后热液作用,以及不同阶段成矿流体成分和温度的差异[46]。地球化学和熔体-流体包裹体研究显示,伟晶岩中的热液流体多来自于伟晶岩浆体系本身在演化过程中分异的流体[11] [47]。稀有金属矿物可形成于岩浆演化晚期的各阶段(钠长石化、萤石化、硅化、低温碳酸盐化或水合作用)以及热液流体的交代作用。目前在伟晶岩中发现的副矿物多达 150 多种。其中具有代表性的有电气石、绿柱石、锂辉石、锂云母、磷灰石、铌钽铁矿、透锂长石、铯榴石等[46]。其中,稀有元素的富集成矿与交代过程中的钠长石化作用密切相关[32] [33] [48],钠长石化交代作用越强,锂、铍等稀有元素的富集程度越高[49]。

此外,伟晶岩的类型和围岩岩性对稀有金属元素的矿化也有一定控制作用。一般情况下,Th 常与黑云母型伟晶岩有关,而 Be、Th、Nb 等常与二云母型伟晶岩有关,Li、Be、Nb、Ta、Cs 等常发育在白云母型及各种交代型的伟晶岩中。围岩条件对伟晶岩矿床的影响主要表现在 2 个方面,一是围岩的物理性质对伟晶岩的形态的影响,当伟晶岩围岩为片麻岩、大理岩及中基性岩时,这些围岩岩体由于渗透性差,封闭条件优越,伟晶岩常形成单一的巨大的透镜状脉体及膨胀脉体。这种伟晶岩岩脉的带状构造发育,矿物结晶粗大,岩浆分异程度高,有利于稀有金属富集成矿。另外,围岩的成分也会影响伟晶岩中某些稀有金属元素的富集。例如,富铁质的围岩(辉长-辉石岩)则有利于黑稀金矿、复稀金矿的富集,同时也有利于锂辉石的形成[32]。

### 3. 华南地区典型伟晶岩稀有金属矿床

华南地区伟晶岩中发育了大量的稀有金属矿产,形成了数量可观的伟晶岩型稀有金属矿床(表 1),如福建南平伟晶岩型 Ta-Nb 矿床、广东广宁伟晶岩型 Ta-Nb 矿床等。共同造就了华南稀有金属矿产资源基地。

1) 广东省广宁伟晶岩型 Nb-Ta 矿集区。该成矿区位于广东省西部广宁县,包括后溪、村心、洞头南、深坑等几个 Nb-Ta 矿床。矿床赋存于广宁花岗岩体周围侵入震旦纪变质岩的伟晶岩脉中。广宁花岗岩为复合花岗岩体,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为  $434 \pm 3$ 、 $249 \pm 3$  (广东省佛山市地质局)、 $250 \pm 3$ 。规模较大的 8 号伟晶岩脉的长度约为 400 m,厚度为 1.08~9.60 m,平均品位为 0.0074%  $Nb_2O_5$  和 0.0064%  $Ta_2O_5$ 。1 号伟晶岩脉长 > 500 m,厚度 1100~9.81 m,平均品位 0.0094%  $Nb_2O_5$ 、0.0080%  $Ta_2O_5$  (广东省地质局,未公布资料)。洞头南矿床含 > 100 m 的伟晶岩脉,大部分侵入震旦纪变质岩,长度 100~200 m,厚度 2~8 m [51]。

2) 湖南省幕阜山地区伟晶岩型 Nb-Ta 多金属矿床位于江南隆起岩浆构造成矿带的幕阜山地区是我国重要的稀有金属矿集区[52] [53],主要经历了前加里东构造拼合→印支期俯冲汇聚→燕山早期汇聚走滑→燕山晚期离散走滑的构造发展过程[54] [55] [56] [57]。多期次岩浆活动的叠加为幕阜山地区白垩纪广泛的稀有金属成矿提供了物质基础[54],幕阜山稀有金属矿集区 Be-Nb-Ta-Li 的成矿时代为  $127.7 \pm 3.7$  Ma [55]。该

地区矿床以仁里 - 传梓源最具代表性。仁里 - 传梓源矿床分布于幕阜山复式花岗岩基内部及外缘与冷家溪群片岩的接触带,是2017年发现的高品位超大型伟晶岩 Nb-Ta 多金属矿床。是我国已报道的铌钽矿床中最高品位的钽矿床。该矿床中的伟晶岩脉走向北西,倾向为南西,成群出现,规模较大。具伟晶结构、花岗结构、块状构造,矿物组成位石英、钾长石、钠长石及白云母、绢云母、石榴子石、锂云母等。受幕阜山花岗岩体侵位时的挤压和剪切影响,区内片岩分带明显,层间破碎带和片理发育,伟晶岩脉水平分布其间。由岩体接触带往外,依次为石榴子石片岩带 - 含十字石二云母片岩带 - 绢云母片岩带[58]。西起窄板洞,东至三墩乡,北起秦家坊,南至传梓源 46 平方千米范围内,已查明脉体厚度大于 1 m,长度大于 50 m 的伟晶岩脉超过 926 条,其中产于花岗岩内带的约 712 条,产于岩体外带板岩中的有 214 条。

3) 福建省南平伟晶岩型 Nb-Ta-Sn 多金属矿床该矿床位于中国福建西北部,处于闽西北隆起带与闽西南拗陷带交界处靠北东向的政和 - 大埔断裂带一侧。是以铌钽矿物种类多、富钽为特征的大型稀有金属矿田。该区加里东晚期的混合岩及花岗岩类分布较广泛。泥盆纪以后又经受了海西 - 印支运动,特别是燕山运动的影响,产生了众多的与各构造旋回相应的伟晶岩脉。其中具工业意义的主要是加里东和海西旋回的伟晶岩脉。它们主要分布于褶皱带中相对拗陷的部位。加里东期伟晶岩多集中于褶皱带的中北部,而海西期的伟晶岩基本只局限于褶皱带的南侧。海西旋回晚期形成的西坑伟晶岩矿田还跨越了闽西南海西 - 印支拗陷带。因此,不同时代的伟晶岩具有较明显的区域性分布特征。以南平花岗伟晶岩中分异程度最好的南平 31 号花岗伟晶岩脉为代表岩脉。该岩脉位于西坑溪源头南矿段中部,呈北北东走向,长 300~600 m,厚 5~6 m,宽 90 m,侵入到中 - 新元古界万全岩群下峰岩组的片岩和变粒岩中。岩脉内部矿物组合较复杂,带状构造较为明显[59]。

**Table 1.** Typical pegmatite rare metal deposits in South China

**表 1.** 华南地区典型伟晶岩稀有金属矿床

矿床名称	矿床类型	矿种	大地构造位置
福建南平西坑	伟晶岩	Ta、Nb	华南褶皱系华夏褶皱带
广东广宁毕院	伟晶岩	Ta、Nb	华南褶皱系云开褶皱带
广东曲江一六	伟晶岩	Ta、Nb	华南褶皱系赣湘桂粤褶皱带
西港伟晶岩型钽铌锂辉石矿床	伟晶岩	Li、Nb、Ta	华南加里东褶皱系中武夷山隆起西缘
福建南平 31 号脉	伟晶岩	Nb、Ta、Sn	华夏地块东北部
福建西坑	伟晶岩	Nb、Ta	闽西北加里东褶皱带东南
福建云霄	伟晶岩	-	闽东火山活动亚带的福安-平和和火山喷发带南端
广西资源坪水底	伟晶岩	Li、Nb、Ta、Be	江南古陆东南缘桂东北拗陷区
广西栗木	伟晶岩	Sn、W、Ta、Nb	江南古陆东南缘桂东北拗陷区
广西姑婆山	伟晶岩	Sn	江南古陆湘南桂东北拗陷区

#### 4. 桂东南地区成矿潜力稀有金属伟晶岩

桂东南地区伟晶岩分布较广,主要赋存于桂南晚志留世宁潭超单元及其外接触带中。其次其它时代的花岗岩体和地层中有少量出现。笔者根据对桂东南地区的野外地质调查,以及前人的资料总结了研究区内伟晶岩的形态特征:伟晶岩一般呈脉状,少数呈透镜状、团块状或不规则状。多成群出现,分布有一定方向性,产状常受围岩的节理、片麻理和地层层理控制。在岩石类型上以花岗伟晶岩为主,有少量钾长伟晶岩。再结合前人对这些矿点所做的物探化探资料,进行了采样与地球化学分析,圈定出区内稀

有金属伟晶岩 4 处主要的发育集中区(图 3), 包括:

1) 桂东地区县容伟晶岩群。分布于岑溪市县容镇一带, 伟晶岩呈脉状、透镜状与正长岩相伴侵入于大隆超单元枫木根单元堇青黑云二长花岗岩中。伟晶岩脉走向多沿东西向张扭性断裂贯入, 亦有北东向、北西向岩脉, 倾角较陡, 一般为  $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ , 脉壁清晰。脉宽多为数十米, 以钾长伟晶岩、花岗伟晶岩为主, 部分伟晶岩中富含磷、铀、钍、氟等元素和呈巨型柱状晶(长 40 mm)氟磷灰石。

2) 云开地区石垌伟晶岩群。位于陆川县良田镇附近。岩脉成群侵入于寒武系变粒岩、片岩中。据富含铌、钽等特征类比, 时代为燕山期。岩脉倾向  $320^{\circ}\sim 350^{\circ}$ , 倾角  $10^{\circ}\sim 45^{\circ}$ , 多平行片理分布, 与围岩界线不明显, 少数岩脉倾向  $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ , 倾角  $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 和倾向  $110^{\circ}\sim 140^{\circ}$ , 倾角  $60^{\circ}\sim 85^{\circ}$ , 多沿后期构造裂隙贯入。伟晶岩以脉状为主, 次为不规则囊状、透镜状。脉宽 0.5~2 m, 长 40~120 m。岩石以微斜长石为主, 次为奥长石、石英、白云母等。微斜长石常被钠长石取代。岩脉分异较弱, 部分岩脉从两侧向中心可分细粒、中、粗-巨粒块状体三个带, 中心的矿物粒径 3~5 mm, 个别微斜长石达 30 mm。岩脉的钠长石化、云英岩化较强烈。岩脉一般富含铌铁矿、富铈锆石、锡石、细晶石, 铌、钽等元素含量较高。稀有元素的富集与钠长石化有关, 钠长石化越强, 则含矿性越好。部分伟晶岩脉以微斜长石为主,  $K_2O$  含量 6.8%~8.7%, 个别达 15%, 脉大者可作钾矿利用。

3) 云开地区双旺伟晶岩群。分布于博白县双旺镇地区, 岩群侵入于晚志留世宁潭超单元片麻状黑云二长花岗岩、花岗片麻岩中, 岩脉常成群平行雁列分布。岩脉共 700 余条, 走向以东西向为主, 北西、南北向次之。脉宽一般 0.5~1.5 m, 长 100~200 m, 最长可达 600 余 m, 沿倾向延深达 100~150 m。脉壁

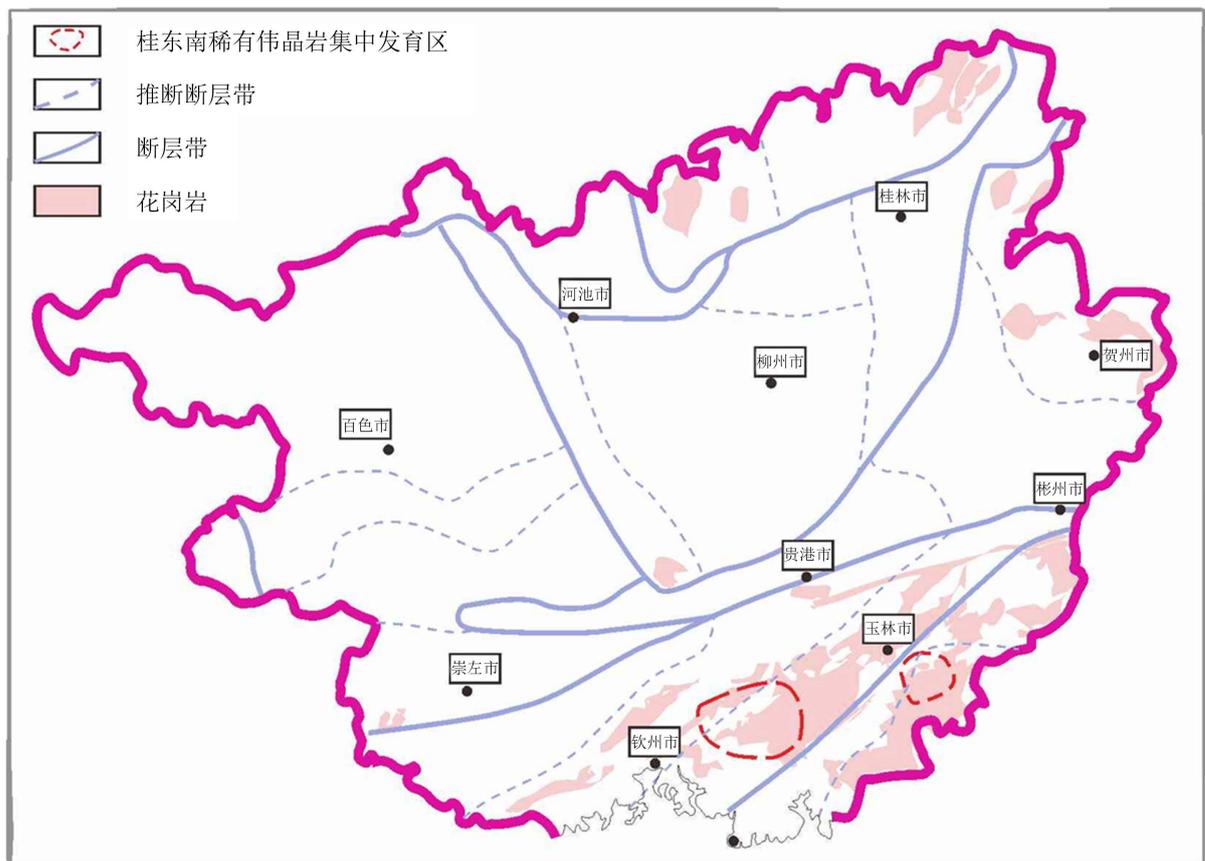


Figure 3. Location map of rare metal pegmatite and related deposits in Southeast Guangxi

图 3. 桂东南稀有金属伟晶岩及相关矿床集中发育位置图

较平整,与围岩界线清楚。伟晶岩脉分异较差。结构简单,极少数具两个结构带。岩石由微斜长石 40%~60%、钠长石 30%~40%、石英 10%~20%及白云母 1%~5%组成,钠质交代作用强而普遍。岩石化学富 SiO<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O 的。岩石中铷、铈、钽、锡、锆、铍、硼、钇、镱等元素含量较高。细晶石、铈钽铁矿、褐钇矿、富钪锆石、磷钇矿、锡石等常见。

4) 云开地区北流六靖伟晶岩群。分布于北流市六靖一带,伟晶岩脉相对较多且脉体较大的分布在博白县及北流市,发现伟晶岩脉、石英脉等近 50 条,其中宽度大于 0.8 m 约占半数。产于片麻状花岗岩体中,沿节理或裂隙贯入,岩脉走向南北或北西。岩脉可达 200 m,宽 0.5~30 m。岩石呈浅红至灰白色,伟晶及文象结构,矿物成分有钾长石 40%~70%、石英 20%~40%、斜长石 10%~12%、白云母 3%~8%等。其中由于铷元素与钾元素的类质同象作用,白云母和钾长石,尤其是白云母中赋存了大量的 Rb 元素。

## 5. 结论

桂东南地区地处华南板块西南部,华夏地块和扬子地块的交接部位,构造-岩浆作用活跃,出现稀有金属矿化。伟晶岩广泛地分布在桂东南地区,与博白、北流、容县一带大面积出露的高度演化的花岗岩体联系紧密。本次的野外地质调查显示其的稀有金属伟晶岩主要分布在桂南晚志留世宁潭超单元及其外接触带中,受围岩的节理、片麻理和地层层理控制。根据对样品进行的地球化学测试,我们圈定了区内 4 处稀有金属伟晶岩发育集中区: 1) 桂东地区县容富 U 伟晶岩群。2) 云开地区石垌富 Nb-Ta 伟晶岩群。3) 云开地区双旺富 Rb-Nb-Ta-Sn 伟晶岩群。4) 云开地区北流六靖富 Rb 伟晶岩群。

本次工作对区内前人长期忽视的大量花岗伟晶岩体进行了调查,并指明了 4 处伟晶岩型稀有金属矿床的有利找矿区域。可以预见其中的稀有金属资源具备了巨大的发掘潜力。然而,由于该地区研究程度不完整,尚未进行有效的开发利用。这方面的空缺仍亟需广大地质工作者们来填补。

## 参考文献

- [1] 毛景文,李红艳,宋学信,王登红,张景凯. 湖南柿竹园钨锡钼铋多金属矿床地质与地球化学[C]//中国地质学会、国土资源部地质勘查司.“十五”重要地质科技成果暨重大找矿成果交流会材料二——“十五”地质行业获奖成果资料汇编.中国地质学会、国土资源部地质勘查司:中国地质学会,2006:2.
- [2] 王登红,郑绵平,王成辉,高树学,商朋强,杨献忠,樊兴涛,孙艳. 大宗急缺矿产和战略性新兴产业矿产调查工程进展与主要成果[J]. 中国地质调查,2019,6(6):1-11.
- [3] 翟明国,吴福元,胡瑞忠,蒋少涌,李文昌,王汝成,王登红,齐涛,秦克章,温汉捷. 战略性关键金属矿产资源:现状与问题[J]. 中国科学基金,2019,33(2):106-111.
- [4] 王登红,王瑞江,李建康,赵芝,于扬,代晶晶,陈郑辉,李德先,屈文俊,邓茂春,付小方,孙艳,郑国栋. 中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述[J]. 中国地质,2013,40(2):361-370.
- [5] 陈喜峰,陈秀法,李娜,叶锦华,陈玉明,赵宏军,张伟波. 全球铌矿资源分布特征与开发利用形势及启示[J]. 中国矿业,2019,28(5):7-12+23.
- [6] Linnen, R.L. and Cuney, M. (2005) Granite-Related Rare Element Deposits and Experimental Constraints on Ta-Nb-W-Sn-Zr-Hf Mineralization. *Geological Association of Canada Short Course Notes*, 17, 45-68.
- [7] Linnen, R.L., Van Lichtervelde, M. and Cerny, P. (2012) Granitic Pegmatites as Sources of Strategic Metals. *Elements*, 8, 275-280. <https://doi.org/10.2113/gselements.8.4.275>
- [8] Michallik, R.M., Wagner, T., Fusswinkel, T., Heinonen, J.S. and Heikkil, P. (2017) Chemical Evolution and Origin of the Luumki Gem Beryl Pegmatite: Constraints from Mineral Trace Element Chemistry and Fractionation Modeling. *Lithos*, 274-275, 147-168. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.01.001>
- [9] 王登红,邹天人,徐志刚,余金杰,付小方. 伟晶岩矿床示踪造山过程的研究进展[J]. 地球科学进展,2004(4):614-620.
- [10] 王登红,李建康,付小方. 四川甲基卡伟晶岩型稀有金属矿床的成矿时代及其意义[J]. 地球化学,2005(6):3-9.
- [11] 朱金初,王汝成,陆建军,张文兰. 关于南岭中生代花岗岩侵入年龄与锆石 U-Pb 年龄的时差问题:与章邦桐教

- 授等讨论[J]. 高校地质学报, 2010, 16(1): 119-123.
- [12] 李建康, 王登红, 张德会, 付小方. 川西甲基卡伟晶岩型矿床中含硅酸盐矿物包裹体的发现及其意义[J]. 矿床地质, 2006, 25(S1): 131-134.
- [13] 周芳春, 刘翔, 李建康, 黄志飏, 肖国强, 李鹏, 周厚祥, 石威科, 谭黎明, 苏俊男, 陈虎, 汪宣民. 湖南仁里超大型稀有金属矿床的成矿特征与成矿模型[J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(1): 77-91. <https://doi.org/10.16539/j.dgzycx.2019.01.007>
- [14] 刘迪. 桂东南马山玄武岩地球化学特征及构造意义[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2019. <https://doi.org/10.27050/d.cnki.gglgc.2019.000077>
- [15] 张文兵, 蔡明海, 李强, 薛彦萍, 刘翔, 郑浩. 广西油麻坡钨钼矿床流体包裹体与成因探讨[J]. 西北地质, 2017, 50(2): 178-190. <https://doi.org/10.19751/j.cnki.61-1149/p.2017.02.019>
- [16] 王志强, 陈斌, 马星华. 广西陆川-博白成矿带多期次岩浆活动与钨钼成矿作用[J]. 地质学报, 2017, 91(2): 421-439.
- [17] 王炯辉, 马星华, 李毅, 陆灿友, 陈凌云, 陈斌, 王志强. 花岗质复式岩体成因及其与 W-Mo 成矿的关系——以广西油麻坡岩体为例[J]. 地质学报, 2014, 88(7): 1219-1235.
- [18] 冯定素. 广西油麻坡矽卡岩型钨钼矿床成因初步研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017
- [19] 付伟, 柴明春, 杨启军, 韦龙明, 黄小荣, 冯经平. 广西佛子冲大型铅锌多金属矿床的成因: 流体包裹体和 H-O-S-Pb 同位素地球化学约束[J]. 岩石学报, 2013, 29(12): 4136-4150.
- [20] 韦龙明, 冯经平, 付伟, 杨启军, 林煜强, 覃日贤. 广西佛子冲铅锌矿绿色岩 REE 地球化学特征及成矿指示意义[J]. 桂林理工大学学报, 2012, 32(2): 155-161.
- [21] 雷良奇, 宋慈安, 冯佐海. 广西佛子冲铅锌(银)成矿带多元素富集特征及矿床成因[J]. 矿床地质, 2002(1): 74-82.
- [22] 杨斌, 刘兴德, 刘建明. 广西佛子冲铅锌矿田两种矿石类型及其成因意义[J]. 桂林工学院学报, 2002(2): 109-113+213.
- [23] 冯佐海, 雷良奇, 张起钻, 骆良羽, 杨志强. 佛子冲铅锌矿田火山岩覆盖区构造控矿特征[J]. 有色金属矿产与勘查, 1999(6): 423-427.
- [24] 詹华忠, 丁伟晶, 何波, 孔凡全, 颜历. 桂东南博白地区片麻状花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造环境研究[J]. 矿产与地质, 2020, 34(4): 724-733.
- [25] 王炯辉, 王志强, 陈斌. 广西三叉冲钨矿有关岩体岩石成因: 锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学及 Nd 同位素制约[J]. 地球化学, 2014, 43(6): 549-573. <https://doi.org/10.19700/j.0379-1726.2014.06.001>
- [26] 王新宇. 广西云开地区燕山晚期岩浆活动与钨成矿作用[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- [27] Zhu, Y.F., Zeng, Y.S. and Gu, L.B. (2006) Geochemistry of the Rare Metal-Bearing Pegmatite No. 3 Vein and Related Granites in the Keketuohai Region, Altay Mountains, Northwest China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27, 61-77. <https://doi.org/10.1016/j.jseacs.2005.01.007>
- [28] Wang, T., Tong, Y., Jahn, B.M., Zou, T.R., Wang, Y.B., Hong, D.W. and Han, B.F. (2007) SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of the Altai No. 3 Pegmatite, NW China, and Its Implications for the Origin and Tectonic Setting of the Pegmatite. *Ore Geology Reviews*, 32, 325-336. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.10.001>
- [29] Cao, Y.T., Liu, L., Wang, C., Chen, D.L. and Zhang, A.D. (2009) P-T Path of Early Paleozoic Pelitic High-Pressure Granulite from Danshuiquan Area in Altyn Tagh. *Acta Petrologica Sinica*, 25, 2260-2270. (In Chinese)
- [30] 任宝琴, 张辉, 唐勇, 吕正航. 阿尔泰造山带伟晶岩年代学及其地质意义[J]. 矿物学报, 2011, 31(3): 587-596.
- [31] 刘丽君, 付小方, 王登红, 郝雪峰, 袁藺平, 潘蒙. 甲基卡式稀有金属矿床的地质特征与成矿规律[J]. 矿床地质, 2015, 34(6): 1187-1198.
- [32] 卢欣祥, 祝朝辉, 谷德敏, 张画眠, 吴梅, 吴艳. 东秦岭花岗伟晶岩的基本地质矿化特征[J]. 地质论评, 2010, 56(1): 21-30.
- [33] 朱焕巧, 李卫红, 惠争卜, 赵如意, 王江波, 龚奇福. 陕西丹凤三角地区花岗伟晶岩铀-稀有元素矿化特征及成矿作用分析[J]. 西北地质, 2015, 48(1): 172-178.
- [34] 王文谟, 杨岳清, 陈成湖, 等. 福建南平花岗伟晶岩中的铋钽矿物学研究[J]. 福建地质, 1999, 18(3): 113-134.
- [35] 杨岳清, 王文瑛, 林国新, 等. 福建南平花岗伟晶岩中钾长石的矿物学研究[J]. 福建地质, 2003, 22(1): 1-12.
- [36] 杨岳清, 王文瑛, 倪云祥, 等. 福建南平花岗伟晶岩中绿柱石的矿物学研究[J]. 福建地质, 1998, 17(2): 68-78.

- [37] 吴尚全, 张甫, 刘刚. 内蒙古自治区哈达门沟伟晶岩金矿地质[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [38] 邹天人, 徐珏. 中国碱性伟晶岩型透辉宝石石矿床[J]. 矿床地质(增刊), 1996, 15(S1): 42-43.
- [39] Lenbaro, S.L.R., Moura, M.A. and Botelho, N.F. (2002) Petrogenetic and Mineralization Processes in Paleo- to Mesoproterozoic Rapakivi Granites; Examples from Pitinga and Goias, Brazil. *Precambrian Research*, **119**, 277-299. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00126-2](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00126-2)
- [40] Tomascak, P.B., Krogstad, E.J. and Walker, R.J. (1998) Sm-Nd Isotope Systematics and the Derivations of Granitic Pegmatites in Southwestern Maine. *The Canadian Mineralogist*, **36**, 327-337.
- [41] 文春华. 幕阜山南缘地区伟晶岩矿物学、地球化学特征及含矿性分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(1): 67-74.
- [42] London, D. and Evensen, J.M. (2003) Beryllium in Silicic Magmas and the Origin of Beryl-Bearing Pegmatites. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **50**, 445-486. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.50.11>
- [43] 朱金初, 吴长年, 刘昌实, 李福春, 黄小龙, 周东山. 新疆阿尔泰可可托海 3 号伟晶岩脉岩浆——热液演化和成因[J]. 高校地质学报, 2000(1): 40-52. <https://doi.org/10.16108/j.issn1006-7493.2000.01.006>
- [44] Shmakin, B.M. (2008) Diversity of Accessory Minerals in Rare-Metal-Rare Earth Pegmatites. *Geology of Ore Deposits*, **50**, 518-523. <https://doi.org/10.1134/S1075701508070027>
- [45] 李文, 李兆麟, 石贵勇. 云南哀牢山伟晶岩流体来源研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001(4): 266-270.
- [46] Sirbescu, M.-L.C. and Nabelek, P.I. (2003) Crystallization Conditions and Evolution of Magmatic Fluids in the Harney Peak Granite and Associated Pegmatites, Black Hills, South Dakota—Evidence from fluid inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **67**, 2443-2465. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(02\)01408-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(02)01408-4)
- [47] 李建康. 川西典型伟晶岩型矿床的形成机理及其大陆动力学背景[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.
- [48] 陈国建. 福建南平花岗岩伟晶岩型钽铌矿床地质特征与成因[J]. 地质通报, 2014, 33(10): 1550-1561.
- [49] 王核, 李沛, 马华东, 朱炳玉, 邱林, 张晓宇, 董瑞, 周楷麟, 王敏, 王茜, 闫庆贺, 魏小鹏, 何斌, 卢鸿, 高昊. 新疆和田县白龙山超大型伟晶岩型锂铷多金属矿床的发现及其意义[J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41(6): 1053-1062.
- [50] Shearer, C.K., Papike, J.J. and Jolliff, B.L. (1992) Petrogenetic Links among Granites and Pegmatites in the Harney Peak Rare-Element Granite-Pegmatite System, Black Hills, South Dakota. *The Canadian Mineralogist*, **30**, 785-809.
- [51] Luo, Y.H. and Qin, Y.S. (2006) Tectonics Characteristics of HaoxiNb Ta Fe Deposit in Guangning County, Guangdong Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, **33**, 33-38.
- [52] 李建康, 刘喜方, 王登红. 中国铷矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2269-2283.
- [53] 李建康, 邹天人, 王登红, 丁欣. 中国铍矿成矿规律[J]. 矿床地质, 2017, 36(4): 951-978.
- [54] 李鹏, 李建康, 裴荣富, 冷双梁, 张旭, 周芳春, 李胜苗. 幕阜山复式花岗岩体多期次演化与白垩纪稀有金属成矿高峰: 年代学依据[J]. 地球科学, 2017, 42(10): 1684-1696.
- [55] 李鹏, 李建康, 张立平, 黄志飏, 刘翔, 周芳春, 曾乐. 幕阜山西南缘黄柏山稀有金属伟晶岩密集区的发现及意义[J]. 矿床地质, 2019, 38(5): 1069-1076.
- [56] 周效华, 陈荣, 张炜, 李春海, 高天山, 马雪, 朱清波, 靳国栋. 江南造山带九岭南缘宜丰岩组火山岩锆石 SHRIMP 年代学及 Hf 同位素特征[J]. 地质学报, 2019, 93(5): 1069-1080.
- [57] 黄志飏, 李鹏, 周芳春, 刘翔, 李建康, 肖国强, 张立平, 陈虎, 汪宣民. 幕阜山地区新元古代花岗岩地球化学特征及成因探讨[J]. 桂林理工大学学报, 2018, 38(4): 614-624.
- [58] 刘翔, 周芳春, 黄志飏, 李建康, 周厚祥, 肖国强, 包云河, 李鹏, 谭黎明, 石威科, 苏俊男, 黄小强, 陈虎, 汪宣民, 林跃, 刘晓敏. 湖南平江县仁里超大型伟晶岩型铌钽多金属矿床的发现及其意义[J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42(2): 235-243. <https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.2018.02.004>
- [59] 杨岳清, 倪云祥, 郭永泉, 仇年铭, 陈成湖, 蔡朝发, 张亚萍, 刘加斌, 陈月仙. 福建西坑花岗岩伟晶岩成矿特征[J]. 矿床地质, 1987(3): 10-21.