

doi: 10.12029/gc20220211001

肖惠良, 李海立, 范飞鹏, 曾载淋, 陈乐柱, 周延, 孙建东, 肖凡, 陈小勇, 陈斌锋. 2023. 论南岭东段地区锂铍铌钽矿找矿方向[J]. 中国地质, 50(3): 653–676.

Xiao Huiliang, Li Haili, Fan Feipeng, Zeng Zailin, Chen Lezhu, Zhou Yan, Sun Jiandong, Xiao Fan, Chen Xiaoyong, Chen Binfeng. 2023. The mineral prospecting direction of Li–Be–Nb–Ta deposits in East Nanling region[J]. *Geology in China*, 50(3): 653–676(in Chinese with English abstract).

论南岭东段地区锂铍铌钽矿找矿方向

肖惠良^{1,2}, 李海立^{1,2}, 范飞鹏^{1,2}, 曾载淋³, 陈乐柱¹,
周延^{1,2}, 孙建东¹, 肖凡¹, 陈小勇⁴, 陈斌锋⁴

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016; 2. 环太平洋战略矿产资源联合研究中心, 江苏 南京 210016;
3. 江西省地质局水文地质大队, 江西南昌 330029; 4. 江西省地质局第七地质大队, 江西 赣州 341000)

摘要:【研究目的】南岭东段是中国重要的锂铍铌钽多金属矿床集中区, 区内锂铍铌钽关键金属矿资源潜力巨大, 该区锂铍铌钽矿主攻类型和找矿突破是亟待解决的关键问题。【研究方法】本文在南岭东段进行钨锡、稀有、稀土矿产调查的基础上, 系统地剖析了区域成矿地质条件、物化遥及找矿最新成果。【研究结果】提出该区燕山期和加里东期锂铍铌钽大规模成矿作用; 指出该区锂铍铌钽矿主攻矿床类型为与燕山期高分异花岗岩有关的白(锂)云母钠长石花岗岩型 Nb–Ta–Be–Li 矿床, 和与加里东晚期花岗岩有关的伟晶岩型 Li–Be–Nb–Ta 矿床, 并划分了 11 处锂铍铌钽矿找矿远景区, 优选了 20 个(6 个 A 级、6 个 B 级、8 个 C 级)锂铍铌钽矿找矿靶区。【结论】建议对 6 个 A 级找矿靶区优先开展预查和普查工作, 以期早日实现该区锂铍铌钽矿找矿新的重大突破。

关键词: 锂铍铌钽矿; 高分异花岗岩; 伟晶岩; 矿产勘查工程; 找矿方向; 南岭东段

创 新 点: (1) 首次提出南岭东段地区燕山期和加里东期锂铍铌钽大规模成矿作用; (2) 指出该区锂铍铌钽矿主攻矿床类型为与燕山期高分异花岗岩有关的白(锂)云母钠长石花岗岩型 Nb–Ta–Be–Li 矿床, 以及与加里东晚期花岗岩有关的伟晶岩型 Li–Be–Nb–Ta 矿床; (3) 圈定了 11 处锂铍铌钽矿找矿远景区, 优选了 20 个锂铍铌钽矿找矿靶区。

中图分类号: P618.6 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2023)03–0653–24

The mineral prospecting direction of Li–Be–Nb–Ta deposits in East Nanling region

XIAO Huiliang^{1,2}, LI Haili^{1,2}, FAN Feipeng^{1,2}, ZENG Zailin³, CHEN Lezhu¹, ZHOU Yan^{1,2},
SUN Jiandong¹, XIAO Fan¹, CHEN Xiaoyong⁴, CHEN Binfeng⁴

(1. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China*; 2. *Research Centre for Pacific Rim Strategic Mineral Resources, Nanjing 210016, Jiangsu, China*; 3. *Hydrology and Geology Brigade of Jiangxi Bureau of Geology, Nanchang 330029, Jiangxi, China*; 4. *The Seventh Geological Brigade of Jiangxi Bureau of Geology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China*)

收稿日期: 2022–02–11; 改回日期: 2022–06–24

基金项目: 中国地质调查局项目(1212010533003、1212010881305、1212011120811、12120114024501、121201120813、121201208000160021、DD20190153)资助。

作者简介: 肖惠良, 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 主要从事矿产勘查和矿床学、地球化学研究; E-mail: njxhuiliang@163.com。

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] The East Nanling region is an important concentration area of Li-Be-Nb-Ta polymetallic deposits, and the potential of Li-Be-Nb-Ta mineral resources is huge. The main types and prospecting breakthrough of Li-Be-Nb-Ta deposits are the key issues to be urgently solved in this area. **[Methods]** Based on the investigation of tungsten, tin, rare and rare earth minerals, we systematically summarized the conditions of regional metallogenic geological, geochemical and geophysical achievements and remote sensing, and latest achievements of prospecting in the east Nanling. **[Results]** It is proposed that the large-scale mineralization of Li-Be-Nb-Ta deposits in this area during the Yanshanian and Caledonian periods. We proposed that the main prospecting deposit types of Li-Be-Nb-Ta deposits are muscovite (lepidolite) albite granite-type related to Yanshanian highly differentiated granite, and pegmatite-type related to Late Caledonian granite. 11 prospecting areas for Li-Be-Nb-Ta deposits and 20 prospecting target districts (including 6 A-level, 6 B-level and 8 C-level) have been delineated. **[Conclusions]** It is suggested that the 6 A-level prospecting target areas should be given priority to carry out mineral exploration work, in order to achieve new major breakthroughs in the prospecting of Li-Be-Nb-Ta deposits in the East Nanling region as soon as possible.

Key words: Li-Be-Nb-Ta deposits; highly differentiated granite; pegmatite; mineral exploration engineering; mineral prospecting direction; East Nanling region

Highlights: (1) The large-scale mineralization of Li-Be-Nb-Ta deposits during the Yanshanian and Caledonian periods in the East Nanling is proposed for the first time; (2) It is proposed that the main prospecting deposit types of Li-Be-Nb-Ta deposits are muscovite (lepidolite) albite granite-type related to Yanshanian highly differentiated granite and pegmatite-type related to Late Caledonian granite; (3) 11 prospecting areas for Li-Be-Nb-Ta deposits and 20 prospecting target districts have been delineated.

About the first author: XIAO Huiliang, male, born in 1963, doctor, professor, mainly engaged in research on mineral deposits, geochemistry and mineral exploration; E-mail: njxhuiliang@163.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.1212010533003, No.1212010881305, No.1212011120811, No.12120114024501, No.121201120813, No.121201208000160021 and No.DD20190153).

1 前 言

锂铍铌钽由于具备特殊的物理化学性质,在国民经济建设和国防科技等领域得到广泛运用,是各国高度关注的关键矿产资源。这些金属既可以形成独立的矿床,也可以和其他元素组合形成多矿种的稀有金属矿床。这些金属矿床成矿多与高度分异演化的岩浆活动有关,它们通常在岩浆分异晚期的岩体中聚集成矿(Linnen et al., 2012, 2014; Zhang et al., 2022)。

南岭东段是中国乃至世界上钨锡、稀有、稀土和放射性矿产资源最丰富的地区之一,也是锂铍铌钽等关键金属超常规富集区,资源潜力巨大。该地区矿产地质调查和矿床学最新研究成果表明,伟晶岩型和花岗岩型锂铍铌钽等关键金属矿床广泛分布,新发现了多处与加里东期花岗岩伟晶岩和燕山早期第二、三阶段及燕山晚期高分异花岗岩密切相关的锂铍铌钽成矿有利地段(肖惠良等, 2012)。初步研究发现,凡有锂铍铌钽矿化富集的地段或附近,均有加里东期花岗岩类存在,而与燕山期高分异花岗岩有关的锂铍铌

钽矿床成矿元素更加丰富,往往与钨、锡多金属矿床伴生或共生。可见,加里东期花岗岩类不仅直接分异演化形成伟晶岩型锂铍铌钽矿床,同时还为燕山期蚀变花岗岩型和石英脉型锂铍铌钽矿床成矿提供物质来源(肖惠良等, 2012)。

根据中国地质调查局《战略性矿产找矿行动纲要(2021—2035年)》和《战略性矿产找矿行动实施方案(2021—2035年)》,在新一轮战略性矿产找矿行动中,如何拓宽南岭东段地区锂铍铌钽矿找矿思路,明确找矿目标、主攻类型和方向,并取得锂铍铌钽矿找矿突破,是亟待解决的关键问题。本文在近年来该区矿产调查成果的基础上,结合相关研究成果,通过地质、地球化学和地球物理等资料的综合研究,提出该区锂铍铌钽矿床主攻矿床类型和找矿方向。

2 区域地质背景

南岭地区指包括湘南、赣南、桂北、粤北的成矿远景区带,地理坐标为107°~116°E, 24°~27°N。该区区域成矿地质条件优越,是中国南方有色、稀有、稀土、放射性矿产的重要成矿远景区带。

南岭东段地区涉及江西赣州地区和吉安地区、湖南郴州地区、广东北部韶关和河源地区,大地构造位于中生代欧亚板块与西太平洋板块消减带大陆一侧的华南陆块中部,横跨扬子与华夏板块及其结合部位(任纪舜和杨巍然,1998)。中生代以来,该区发生多期次、多性质、多方向的挤压和拉张,形成武夷、于山、诸广山—万洋3条规模巨大的北东—北北东向隆起带和桂东—兴国—石城,郴州—崇义—会昌,韶关—三南—寻乌3条大的东西向构造—岩浆—成矿带(图1)。

几十年来,国内外众多地质学家在该区进行了大量的地质学、地球化学、地球物理、遥感地质、矿产调查和勘查工作^{①②③④⑤}(陈毓川等,1989,2014;毛景文等,2007;王登红等,2007,2014b,2018;肖惠良等,2012,2013,2017,2020;秦拯纬等,2022),主要

取得了以下认识:

(1)该区自古—中元古界以来,各时代地层发育齐全。元古代及早古生代以活动型沉积地层为主,泥盆纪及其以后均属浅海或陆相稳定型沉积地层。值得注意的是,近年来在元古宇中风化壳型稀土矿的新发现,以及其中丰富的稀有元素含量,显示其为稀有、稀土矿的矿源层。

(2)该区地壳运动强烈频繁,构造变形错综复杂,具多旋回、多方向不同性质构造叠加复合特征。主要有褶皱、断裂、断升降起、断陷盆地。据构造形迹、展布方向与演化关系,主要有东西向锡田—沙地—大柏地、汝城—崇义—会昌、韶关—三南—寻乌三个隆起带及其所夹拗陷带和北北东向武夷山、于山、诸广山—万洋山隆起带及其所夹断陷盆地,次有于都银坑—宁都青塘地区的北东向构

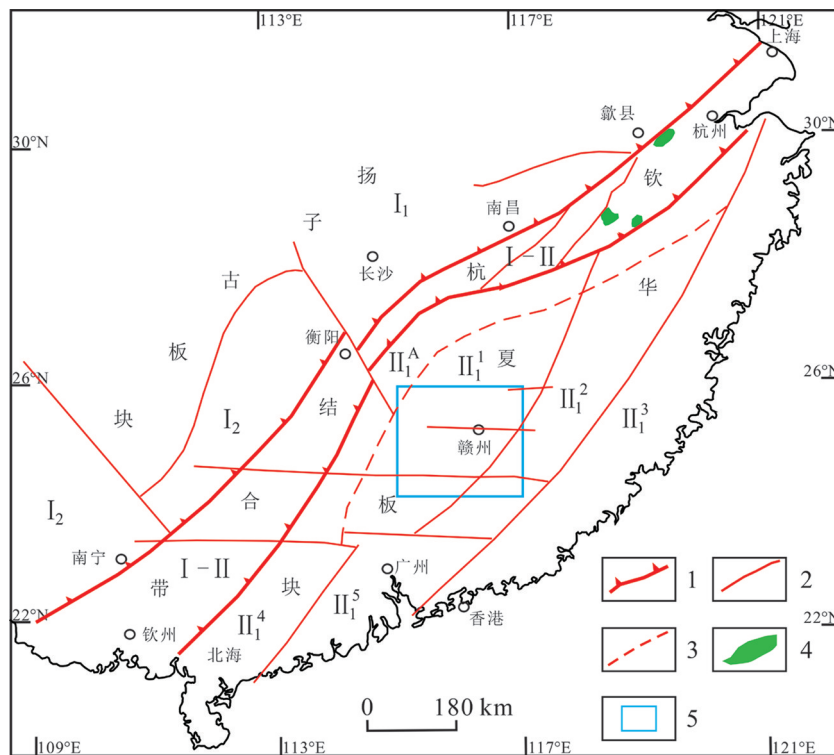


图1 南岭东段大地构造位置图(据杨明桂, 1998)

1—古板块缝合线;2—断层及构造分区界线;3—过渡性构造带边界;4—蛇绿岩块;5—南岭东段地区; I₁—扬子陆块; I₂—湘桂陆缘造山带; I—II—钦杭结合带;; II₁^A—罗霄—仙岩前缘褶皱带; II₁¹—罗霄褶皱带; II₁²—武夷褶皱带; II₁³—东南沿海火山带; II₁⁴—云开褶皱带; II₁⁵—粤东褶皱带

Fig.1 Tectonic location map of the East Nanling region (after Yang Minggui, 1998)

1-The sutures of ancient plate; 2-Fault and tectonic division boundaries; 3-Transitional tectonic zone boundary; 4-Ophiolite; 5-East Nanling region; I₁-Yangtze block; I₂-Hunan—Guangxi continental margin orogenic belt; II₁-Zhejiang—Guangdong continental margin orogenic belt; II₁^A-Luoxiao—Xianyan front fold belt; II₁¹-Luoxiao fold belt; II₁²-Wuyi fold belt; II₁³-Southeast China coastal volcanic belt; II₁⁴-Yunkai fold belt; II₁⁵-East Guangdong fold belt

造,于山、崇余犹地区的南北向构造和定南—上犹一带的北西向构造。

(3)该区岩浆岩发育齐全,分布广泛,自加里东期至喜山期均有岩体出露,以燕山期为主,加里东期次之。近年来,该区花岗岩研究和找矿勘查取得重要进展,一是该区中生代大规模金属成矿作用与广泛分布的燕山期高分异花岗岩密切相关,区内钨锡、稀有、稀土矿是该区燕山期高分异花岗岩分异演化不同阶段的产物;二是该区锂铍铌钽等金属矿化主要与加里东期花岗岩伟晶岩和燕山期高分异花岗岩有关。

(4)区域地球化学特征显示该区地层属硅铝质为主的陆壳物质, Li、Be、Nb、Ta在加里东期和燕山期花岗岩中都有不同程度富集。加里东期岩体富集 W、Sn、Pb、Zn、Li、As、Be、Nb、Ta、U、Th。其中 Be、Ta 特别富集,是锂铍铌钽矿的成矿母岩;燕山早期花岗岩富集元素有 Cu、Pb、Zn、Ag、Sb、W、Sn、Bi、Li、Nb、Ta、As、U、F、Rb 等,而燕山早期第三阶段及晚期花岗岩和晚侏罗世火山岩中 Sn、Cu、Pb、Zn、Nb、Ta、U、稀土元素含量显著增高,为区内锡、铜、稀有、稀土及铀的成矿母岩,形成轻重稀土→Nb、Ta→Be、W、Sn→Mo、Bi→Cu、Pb、Zn→U 矿床系列。

(5)1:20万区域化探资料显示,南岭东段属于

W、Sn、Be、Ag 元素高背景区。成矿元素异常在区域上具有较明显的分带趋势,该区东侧(武夷山西坡)为 Sn、Pb、Li 元素异常带;零山中段为 W、Pb、Zn、Ag、Be 元素异常带;诸广山东坡南部为 W、Sn、Be 元素异常带;三南—寻乌地区为 W、Sn、Be 元素异常带。这种成矿元素异常分带特征,基本反映了区内钨、锡、铍、锂等矿床的展布。Be、Nb 元素异常分布与该区构造—岩浆岩带方向一致,与强烈中酸性岩浆热液活动密切相关(图2)。Be、Nb 异常呈近南北向带状和面状、北东向带状展布,西侧为南北向井冈山—汤湖—诸广山和东西向九峰—大余带,中为北东向万安—上犹—大余—始兴带和北东向宁都—兴国—龙南(零山)带,东为北东向会昌—安远—寻乌带(图2)。1:20万铌钽重砂异常大致与水系沉积物异常吻合,矿物组合主要为铌钽铁矿—褐钇铌矿—绿柱石—细晶石—锡石—黑钨矿等。

3 南岭东段锂铍铌钽花岗岩特征

南岭东段蕴有丰富的钨锡、稀有、稀土等矿产资源,这些矿产多与花岗质岩浆活动密切相关,且具有强烈的成矿专属性^{[10][11]}(章振根,1983;陈毓川等,1989;毛景文,1997;王联魁和黄智龙,2000;毛景文等,2007;陈骏等,2008;肖惠良等,2012;王登

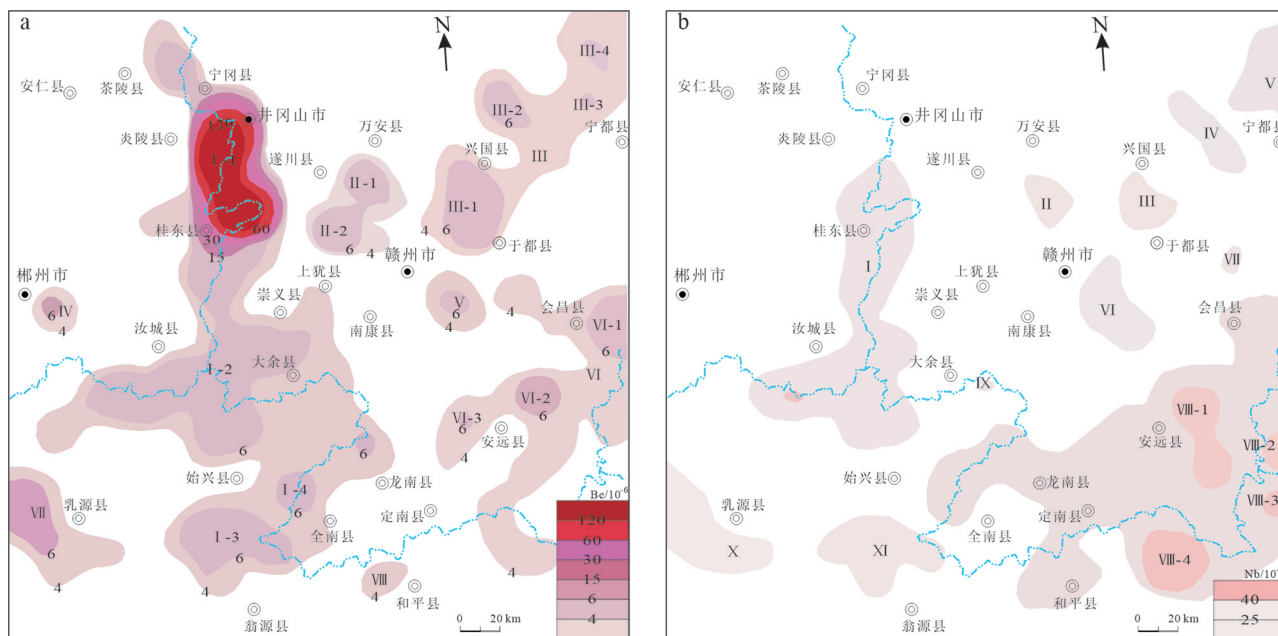


图2 南岭东段地区1:20万铍地球化学图(a)和铌地球化学图(b)

Fig.2 The 1:200000 geochemical map of Be (a) and Nb (b) in the East Nanling region

红等,2014a;李建康等,2017,2019;郭爱民,2017;姚春彦等,2021)。高分异花岗岩分异最彻底的端元为稀有金属或稀有元素花岗岩,与其伴生的矿产主要有钨、锡、铌、钽、锂、铍、铷、铯和稀土等(吴福元等,2017)。

从野外观察来看,高分异花岗岩主要位于岩体的中心部位,往往呈岩株、岩瘤状产出。很多岩体中心部位的补体或晚期岩枝即为高分异花岗岩。从剖面上看,高分异花岗岩从底部到顶部呈现从正常花岗岩向微斜长石花岗岩、天河石花岗岩、锂云母花岗岩、云英岩的岩相变化。在很多情形下,高分异花岗岩与花岗细晶岩或花岗伟晶岩伴生。事实上,花岗细晶岩和花岗伟晶岩在绝大多数情况下都是高分异花岗岩的组成部分,是鉴定岩浆高度分异作用的重要岩石学标志。另一个重要的岩石类型是钠长花岗岩,它基本上是花岗质岩浆高分异作用的产物。

与普通花岗岩相比,高分异花岗岩中的钾长石多为微斜长石,甚至出现天河石;斜长石逐渐减少,并向富钠方向演化。由于强烈的结晶分异作用,I-或S-型花岗岩中角闪石或辉石强烈结晶与分离,导致岩石向富铝方向演化,从而出现较多的白云母和石榴石。另一方面,随着分异作用的深入,岩浆中H₂O、Li、F、B、Cl和P等挥发分不断增加,从而出现锂云母、锂辉石、透锂长石、萤石、黄玉、电气石和磷灰石等特征矿物(朱金初等,2002)。在岩浆演化的不同阶段,电气石的成分会呈现一定的变化。早期的电气石含较多的Mg和Fe,而高度演化的花岗岩浆有可能晶出Al含量高的锂电气石。就云母而言,在岩浆演化过程中,依次从镁质黑云母、镁铁质黑云母、铁质黑云母,向锂铁云母和锂云母方向演化。因此,锂电气石、锂云母或含锂白云母的出现是高分异花岗岩最重要的造岩矿物学标志。花岗岩在高度分异过程中,常见的副矿物除独居石、磷钇矿、磷灰石和榍石外,还包括与W、Sn、Nb、Ta、Be、Cs和稀土元素矿化有关的矿物,如黑钨矿、锡石、铌钽矿、细晶石、绿柱石、硅铍钽矿、铯沸(榴)石、富铯云母、氟碳铈矿、硅铈钽矿和钽石等。特别是绿柱石和铌钽矿,它们是高分异花岗岩中常见的标志性矿物。

南岭东段锂铍铌钽矿床(点)中最为重要特征就是与高度分异演化的岩浆活动有关,锂铍铌钽元

素和挥发分通常在分异晚期的岩体中聚集形成^{①②}。根据Cerny and Scott(2005)含矿花岗岩划分方案,南岭东段含矿花岗岩可以划分为含W-Sn-Mo花岗岩、含Nb-Ta-Zr-U-REE-Sn-W-Li-Be花岗岩、与含Li-Rb-Cs-Be-Ga-Sn-Ta-Nb和稀土元素花岗质伟晶岩3类。其中与锂铍铌钽有关的花岗岩主要有加里东期花岗伟晶岩和燕山期高分异花岗岩。

3.1 加里东期伟晶岩型含锂铍铌钽矿花岗岩特征

区内加里东期花岗岩主要分布在西部的万云山—诸广山和东部的武夷山—雩山等地。加里东期花岗岩体岩性变化大,由边部往内部常见英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和花岗岩,其中加里东晚期花岗岩中常见黑云母花岗岩→电气石花岗岩→二云母花岗岩→细晶岩→伟晶岩演化系列。岩石化学成分显示SiO₂含量60.88%~77.82%,(K₂O+Na₂O)含量5.11%~8.06%,富含钾质,普遍(K₂O>Na₂O),少数K₂O/Na₂O比值偏低,可能与岩石后期的钠质交代有关,Al₂O₃含量12.52%~15.51%,A/CNK一般大于1.0(1.0~1.5),总体为富硅、钾、铝,贫钙、磷及铁镁质,属过铝质花岗岩类;在SiO₂-(K₂O+Na₂O)投影于亚碱性系列中的花岗岩及花岗闪长岩区(图3a),在SiO₂-K₂O图上绝大部分投影于高钾钙碱性系列内,少量落在钾玄岩系列和钙碱性系列(图3b)。稀土元素中轻稀土富集,配分模式为右倾型,具壳源花岗岩稀土特征,Eu亏损较明显,岩石中相对富集大离子元素(Rb、Nb、Ta、Zr、Hf)和部分稀土元素(Ce、Nd、Sm、Y),Ba、Sr、P、Ti呈明显负异常(图4),显示花岗岩是壳源物质部分熔融的产物。

3.2 燕山期蚀变花岗岩型含锂铍铌钽矿花岗岩特征

最新研究成果显示,南岭东段地区燕山期含锂铍铌钽的花岗岩主要为来自燕山早期第二、三阶段和燕山晚期的高分异花岗岩,具有富硅、富钠、富挥发分和富含矿质的特点^{①②③④}(肖惠良等,2017)。

燕山期含锂铍铌钽花岗岩多为中浅成侵位的岩浆岩,与黑云母花岗岩、二云母花岗岩、白云母花岗岩一起构成多相岩体,往往呈现黑云母花岗岩→二云母白云母花岗岩→白云母花岗岩→云英岩的演化系列,其中黑云母花岗岩为主体,含矿花岗岩规模较小,呈岩株、岩瘤、岩脉,主要分布于岩体的顶部。很多岩体中心部位的补体或晚期岩枝即为

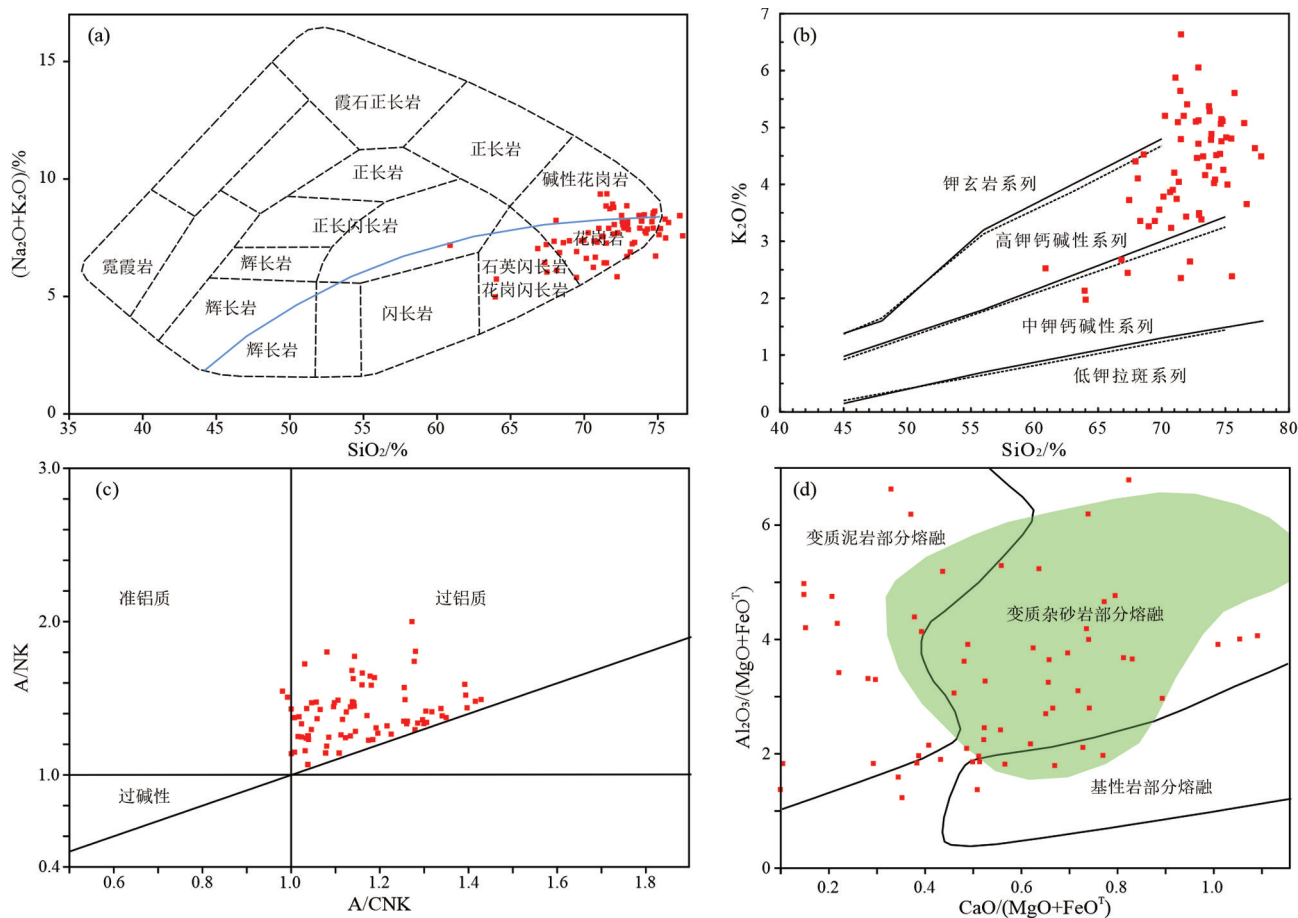


图3 南岭东段加里东期花岗岩岩石特征分类及成因类型判别图

a— SiO_2 — $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 图(据 Maitre, 1989); b— SiO_2 — K_2O 图(据 Rollison, 1993); c— A/CNK — A/NK 图(据 Maniar and Piccoli, 1989); d— $(\text{CaO}/(\text{MgO}+\text{FeO}^{2+}))$ — $(\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO}+\text{FeO}^{2+}))$ 图(据 Nakada and Takahashi, 1979)

Fig.3 Diagrams of petrochemistry feature classification and genesis discrimination for the East Nanling Caledonian granite
a—Diagram of SiO_2 — $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (after Maitre, 1989); b—Diagram of SiO_2 — K_2O (after Rollison, 1993); c—Diagram of A/CNK — A/NK (after Maniar and Piccoli, 1989); d—Diagram of $(\text{CaO}/(\text{MgO}+\text{FeO}^{2+}))$ — $(\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO}+\text{FeO}^{2+}))$ (after Nakada and Takahashi, 1979)

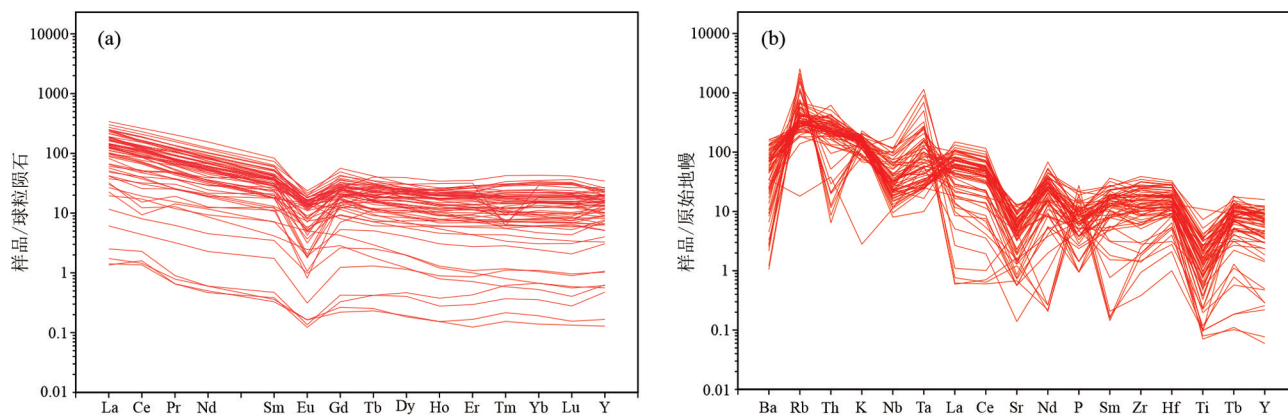


图4 南岭东段加里东期花岗岩稀土元素配分模式图(a)和微量元素蛛网图(b)(据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive-normalized trace element spider diagrams (b) for the East Nanling Caledonian granite (after Sun and McDonough, 1989)

锂铍钽高异花岗岩,岩体自交代和蚀变作用发育。与成矿作用相关的燕山期高异花岗岩总体上属于白云母过铝质花岗岩类,区内燕山期锂铍钽花岗岩经历了强烈的岩浆分离结晶演化过程,是岩浆演化晚期的结晶产物,矿物组合上以石英、钾长石和斜长石为主,是暗色矿物较少的一种淡色花岗岩。岩石组合以正长花岗岩和碱长花岗岩为主,其次为二长花岗岩,花岗岩以小岩体为主,成矿岩浆岩为酸性岩(SiO_2 含量一般变化于72%~78%,个别低于70%),大多超过72%的超酸性花岗岩,碱含量常高于7.6%;为 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$,稀土总量较高、呈负Eu显著的海鸥式配分模式,F和挥发组分含量高,过铝质(图5),主要成矿元素W、(Sn)、Mo、Bi、Li、Be、Nb、Ta、U、Th的背景含量为不同时期侵入岩之最,

且具多期、多阶段、多次成岩特点(图6)。锂(铁)云母、铍钽铁矿、褐钨铀矿、绿柱石发育等锂铍钽矿物作为副矿物常见于燕山期高异花岗岩中,二云母花岗岩和钠长石花岗岩的锂铍钽含量远高于该区花岗岩平均值^{②③}。

4 南岭东段锂铍钽矿床类型特征

南岭东段地区约有钽铌锂铍矿床(点)30余处,其中产于燕山期岩体内的约占矿床(点)总数的83%,产于加里东期岩体内的占矿床(点)约占总数17%。锂铍钽矿产种类较多,分布较广,矿床共、伴生有用稀有金属组分多,依据成矿岩体、矿体特征不同主要分为蚀变花岗岩型、花岗伟晶岩型和热液脉型三种,这些矿床类型既可独立产出,又可共存

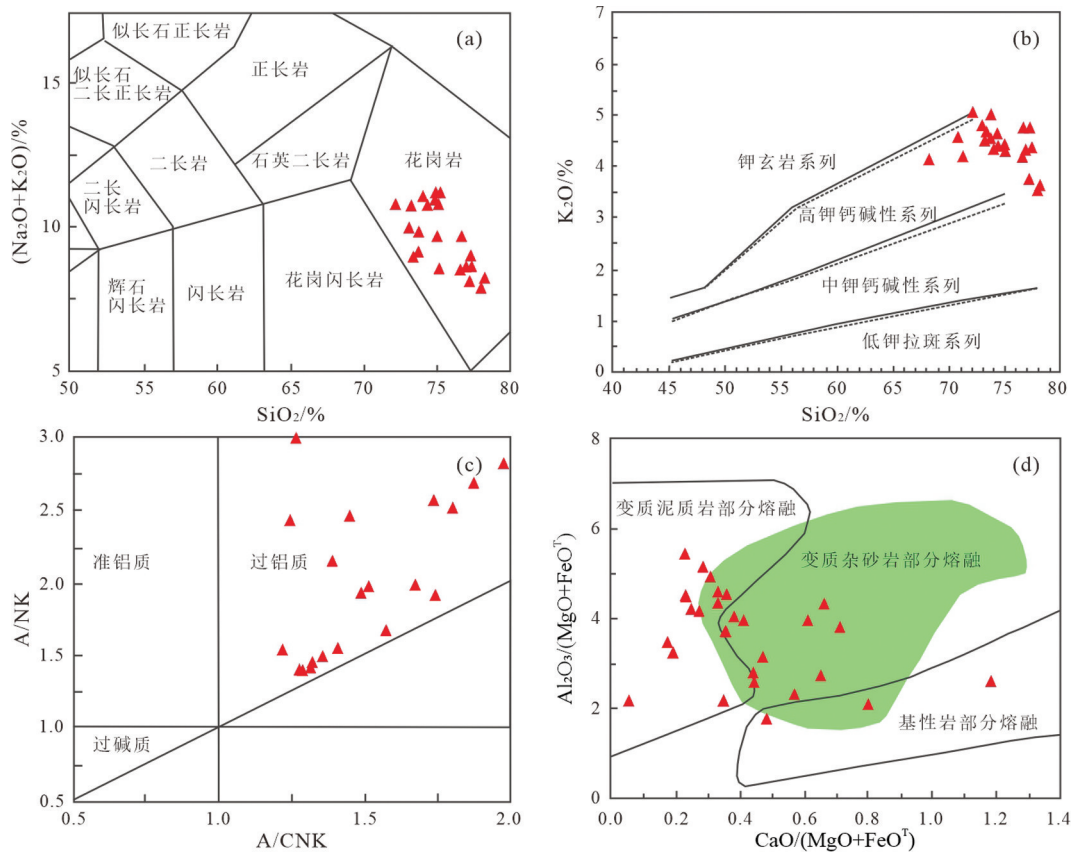


图5 广东始兴良源钽铌矿矿区燕山期高异花岗岩岩石特征分类及成因类型判别图

a— $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 图(据Maitre, 1989); b— $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图(据Rollison, 1993); c— $\text{A}/\text{CNK}-\text{A}/\text{NK}$ 图(据Maniar and Piccoli, 1989); d— $(\text{CaO}/(\text{MgO}+\text{FeO}^{\text{T}}))-(\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO}+\text{FeO}^{\text{T}}))$ 图(据Nakada and Takahashi, 1979)

Fig.5 Diagrams of petrochemistry feature classification and genesis discrimination for Yanshanian highly differentiated granite in Liangyuan mining area, Guangdong Province

a—Diagram of $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (after Maitre, 1989); b—Diagram of $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ (after Rollison, 1993); c—Diagram of $\text{A}/\text{CNK}-\text{A}/\text{NK}$ (after Maniar and Piccoli, 1989); d—Diagram of $(\text{CaO}/(\text{MgO}+\text{FeO}^{\text{T}}))-(\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO}+\text{FeO}^{\text{T}}))$ (after Nakada and Takahashi, 1979)

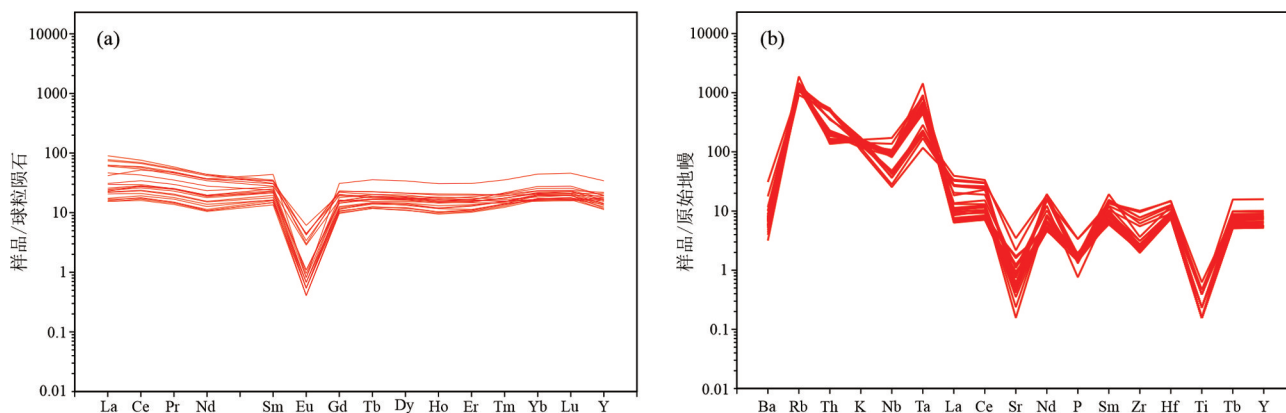


图6 广东始兴良源矿区燕山期高分异花岗岩稀土元素配分模式图(a)和微量元素蛛网图(b)(据 Sun and McDonough, 1989)
Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive-normalized trace element spider diagrams (b) for Yanshanian highly differentiated granite in Liangyuan mining area, Guangdong Province (after Sun and McDonough, 1989)

一体相伴而生,成为“多位一体”的复合型矿床;在成因上主要分为燕山期高分异花岗岩和加里东期花岗伟晶岩2个成矿系列。其中,与燕山期高分异花岗岩有关的蚀变花岗岩型和与加里东期花岗岩有关的花岗伟晶岩型是区内最主要的锂铍钽矿床类型,也是区内锂铍钽矿床找矿的主攻矿床类型。

4.1 蚀变花岗岩型

南岭东段钨锡、稀有、稀土矿产是燕山期高分异花岗岩岩浆分异作用过程中同一岩浆系统不同阶段演化产物,其总体演化趋势为含钨锡黑云母花岗岩→含锡钨二云母花岗岩→含钨锡白云母花岗岩→含钼铍钽钠长石化花岗岩→含钨铍钽白(锂)云母云英岩→含锂铍钽伟晶岩→含钨锡多金属石英脉。前人将该区燕山期岩浆活动划分为2期5阶段(陈毓川等,1989):燕山早期为135~190 Ma,其中165~190 Ma为早期第一阶段,为钨锡矿重要成矿期,150~165 Ma为燕山早期第二阶段,此期为钨锡多金属矿床的重要成矿期,135~145 Ma燕山早期第三阶段,为钨锡及稀有金属的重要成矿期;67~135 Ma为燕山晚期,分早、晚两个阶段,为稀有金属重要成矿期,岩浆活动和矿化作用减弱。与燕山早期第二、三阶段及燕山晚期有关的蚀变花岗岩型锂铍钽矿床往往为钨锡伴生或共生矿床。燕山期岩浆侵位后,在构造活动较为缓和,并有良好盖层相对封闭环境下,随着温度、压力的降低,岩浆分异和结晶,造岩矿物结晶、挥发组分向上运移和富集,锂铍钽矿化主要发生在花岗岩浆高度分异演化晚期,金属矿物在岩浆晚期分异阶段伴随钠

长石、白(锂)云母、石英和绿柱石晶出而富集形成锂铍钽矿床。蚀变花岗岩型锂铍钽矿床产于具有多阶段岩浆活动的燕山期高分异花岗岩体中,位于早期花岗岩(成矿母岩)的顶部、边缘和舌状侵入体的前缘,岩体具有明显的分带现象。从剖面看,锂铍钽高分异花岗岩主要位于岩体的顶部。部分分异程度高的岩体,从底部到顶部呈现从正常花岗岩向黑云母微斜长石花岗岩、二云母花岗岩、白云母钠长石花岗岩、锂云母钠长石花岗岩、云英岩、富云母云英岩的岩相变化。如良源钨铍钽矿区,从下往上依次为:粗粒黑云母花岗岩带—中粒二云母花岗岩带—细粒白云母含钠长石花岗岩带—细粒锂云母钠长石花岗岩带—云英岩带—富云母云英岩带—似伟晶岩带。此外,在很多情形下,锂铍钽高分异花岗岩与花岗细晶岩或花岗伟晶岩伴生。锂铍钽矿体位于岩体的顶凸部位,岩性多为富钠长石浅色花岗岩类,含浅色云母,包括锂云母、铁锂云母、锂白云母和白云母,以富含稀有金属元素为特征。

以良源含矿岩体为例(图7,图8),含矿岩体自下而上,自岩体中心至边缘可以分为:似斑状黑云母花岗岩带→中细粒二云母花岗岩带→细粒锂白云母含钠长石花岗岩带→细粒锂云母钠长石花岗岩带→云英岩→富云母云英岩→似伟晶岩带。矿化常位于岩体的边缘相中,尤以其顶部白云母富钠长石花岗岩带和云英岩带最佳。矿体形态简单,品位低、规模大。钽铌矿物以钽铌铁钪族矿物为主,锂以锂云母分布在云英岩中,铍主要分布在花岗岩和石英细脉中。钽主要分布在细晶石中,锡石次

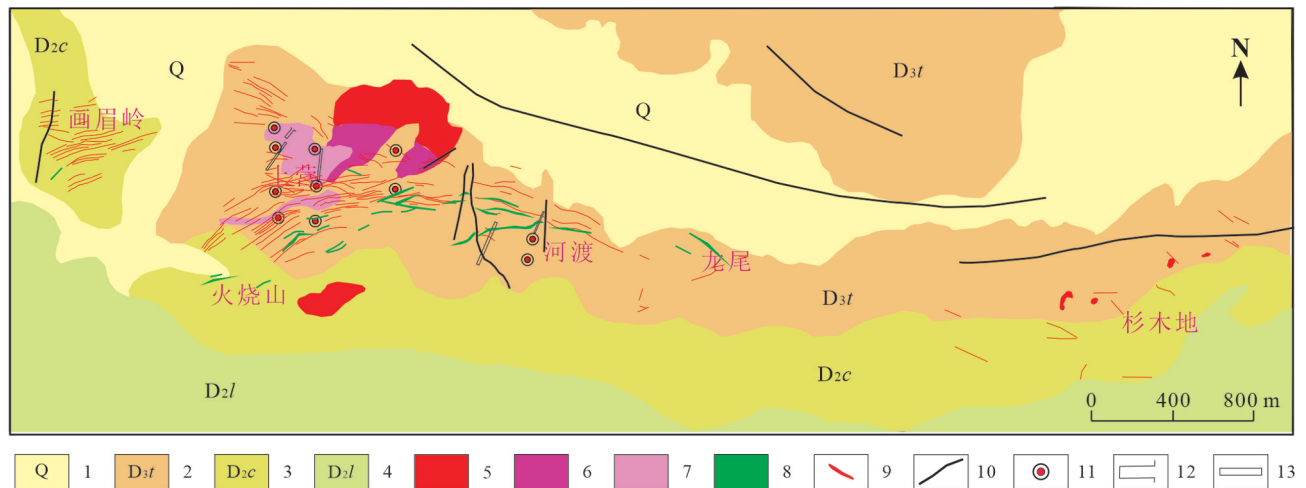


图7 广东始兴良源铌钽铍锂铷钨多金属矿床地质简图

1—第四系坡积物;2—晚泥盆世天子岭组;3—中泥盆世春湾组;4—中泥盆世老虎头组;5—晚侏罗世二云母花岗岩;6—含铌钽铍钨多金属矿白云母花岗岩;7—云英岩型铌钽铍锂铷钨多金属矿体;8—石英斑岩;9—含矿石英脉;10—断层;11—钻孔;12—平硐;13—探槽

Fig.7 Simplified geological map of the Liangyuan Nb-Ta-Be-Li-Rb-W polymetallic deposit in Shixing County, Guangdong Province
1-Quaternary strata; 2-Late Devonian Tianziling Formation; 3-Middle Devonian Chunwan Formation; 4-Middle Devonian Laohutou Formation; 5-Late Jurassic intrusive rocks; 6-Muscovite granite containing Nb-Ta-Be-Rb polymetallic ore body; 7-Greisen containing Nb-Ta-Be-Li-Rb-W ore body; 8-Quartz porphyry vein; 9-Mineralized quartz vein; 10-Faults; 11-Drilling; 12-Mining tunnel; 13-Mining slotting

之,以浸染状分布于蚀变花岗岩中。钨、锡矿物主要呈细脉浸染状、浸染状分布于石英细脉中。矿物组合复杂,主要为黑钨矿、锡石、辉钼矿、辉铋矿、钽铌铁矿、锂云母、绿柱石、石英、白云母等。在蚀变花岗岩型锂铍铷钨矿床中,锂铍铷钨矿体主要富集于云英岩带和白云母钠长石化花岗岩带,从下而上依次呈现 Rb→Pb、Zn、Be→Nb、Ta、Rb→Ta、Nb、Rb、Be→Li、Be、Nb、Ta、REE、Rb、Mo、Bi、W、Sn→Ag、Pb、Zn→W、Sn、Ag (Pb、Zn)→W 的矿化分带。

4.2 花岗伟晶岩型

南岭东段已知伟晶岩型铌钽矿床(点)与加里东期花岗伟晶岩密切相关,主要分布在其母岩(加里东期花岗岩)外接触带 1~7 km 范围内。如会同岩体周边分布的河源、谷寨、锯林池等伟晶岩型锂辉石矿床,蔡屋岩体附近有里海伟晶岩群(图 9,图 10),礞头岩体附近分布了上流田—白石坑伟晶岩群。从母岩体向外,伟晶岩脉群在矿物组成、内部结构、微量元素和矿化特点等方面呈现系统变化,而显示区域分带性。伟晶岩形态以脉状为主,其次有透镜状、囊状、筒状等,其产出受断裂构造控制,沿地层断裂或裂隙产出。主要造岩矿物成分为微斜长石、钠长石、更长石、石英,其次为黑云母、白云

母、电气石和锂辉石。不同区域的伟晶岩,矿物类型和含量差别很大,副矿物也有显著差异,如宁都河源伟晶岩区岩石类型为钠长石、微斜长石和锂辉石三类花岗伟晶岩,伟晶岩脉具有一定分带性,由内而外依次为石英伟晶岩→(微斜长石)钠长石伟晶岩→富云母、微斜长石花岗伟晶岩,由上而下依次为微斜长石伟晶岩→钠长石伟晶岩→微斜长石花岗伟晶岩,副矿物主要为钠长石、微斜长石、石英、白云母、电气石、锂辉石、锂云母、钽铌铁矿、钨钽铁矿、黑钨铀矿、细晶石。石城伟晶岩区分为 5 种伟晶岩,即更长石-微斜长石黑云母伟晶岩、更长石-微斜长石二云母伟晶岩、微斜长石伟晶岩、钠长石-微斜长石伟晶岩、锂辉石-微斜长石-钠长石伟晶岩,副矿物主要为独居石、磷钇矿、黑稀金矿、钽铁矿-钽铁矿、钨钽矿、黑钨铀矿。里海伟晶岩区为微斜长石-钠长石-电气石白云母伟晶岩和钠长石-微斜长石-白云母细晶岩,副矿物主要为钽铌铁矿、钨钽铁矿、钽铁矿、日光榴石、含钽锡石、独居石、钛铁矿、石榴石等。

南岭东段花岗伟晶岩型锂铍铷钨矿床主要分布在含矿母岩的外接触带,矿体呈脉状、层状、似层状,成群成组出现,充填于构造裂隙中,形态复杂,

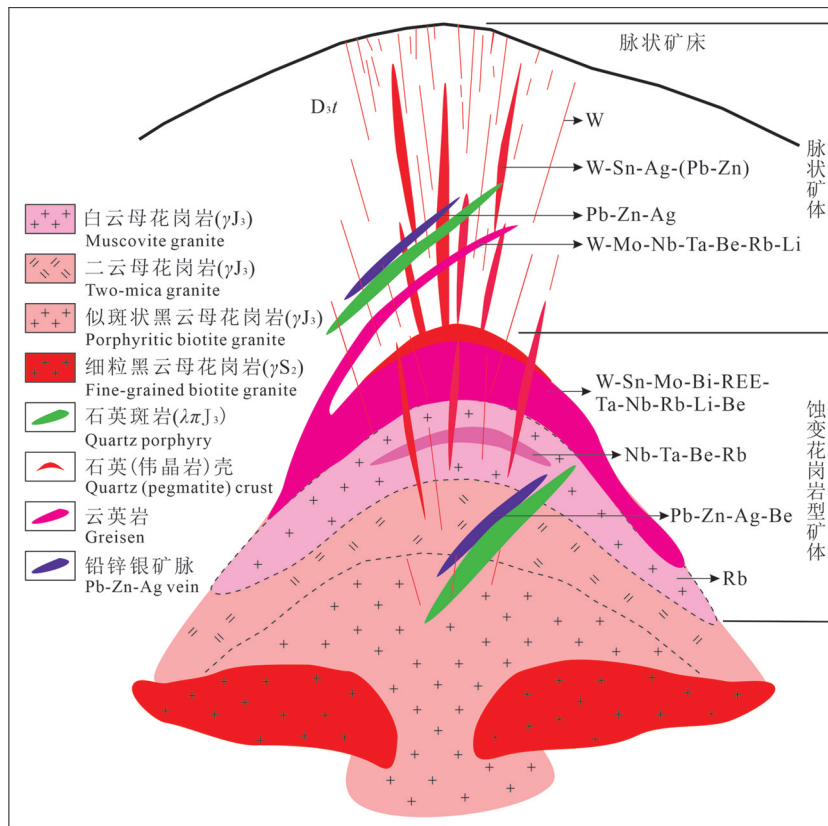


图8 广东始兴良源铌钽锂铍矿床成矿模式图

Fig.8 Metallogenic model of the Liangyuan Nb-Ta-Be-Li-Rb-W polymetallic deposit in Shixing County, Guangdong Province

以脉状为主,次为不规则状、透镜状、囊状、筒状等,有分枝复合、膨缩、归并等现象。脉长几米至数百米不等,宽数米至数十米,延深数十米至百余米不等。其产出受断裂构造控制,沿断裂或裂隙断续出现。与成矿伟晶岩有关的花岗岩体有加里东期黑云母花岗岩、二云母花岗岩、电气石二云母花岗岩和石英闪长岩等。花岗伟晶岩中主要造岩矿物有斜长石、钠长石、更长石、奥长石、石英,其次有黑云母、白云母、锂云母和锂辉石。副矿物主要为独居石、磷钇矿、铌铁矿-钽铁矿、铌铁矿、钽铁矿、黑钨铀矿等。

4.3 石英脉型

石英脉型铌钽锂铍矿床,主要为产于钨锡共、伴生铌钽铍矿床,成矿主要与燕山期高分异花岗岩有关。按矿物组合类型,主要分含钨锡石英脉矿床和长石-石英脉型矿床2种,且以长石-石英脉型为主。长石-石英脉型矿床矿物组合类型主要有绿柱石-白云母-锂云母-石英脉组合、绿柱石-白云母-锂云母-钾长石(微斜长石)组合、辉钼矿-辉铋

矿-绿柱石-黑钨矿-石英组合和黑钨矿-绿柱石-长石-石英脉组合;含钨锡石英脉型矿床矿物组合类型主要有以绿柱石-黑钨矿-锡石-石英脉组合、铁锂云母-绿柱石-黑钨矿-条纹长石-硫化物组合、钽铌铁矿-铌铁矿-绿柱石-锂云母组合和日光榴石-方铅矿-闪锌矿组合,钽铌矿还常以类质同象的形式赋存于锡石、黑钨矿等矿物中。

石英脉型矿床矿石矿物简单,主要有绿柱石、铌钽铁矿、褐钨铌矿、钽铌矿、锂云母等,其他矿物有独居石、钛铁矿、锆石、石榴子石、电气石和白云母。副矿物种类较多,稀有稀土矿物的独居石、磷钇矿、绿帘石含量较高。

5 南岭东段铌钽锂铍矿找矿方向

南岭东段铌钽锂铍矿化信息众多,铌钽锂铍资源潜力巨大。根据区域成矿地质条件、成矿规律研究,结合物探、化探、遥感、自然重砂等工作成果以及矿产检查情况,划分11处找矿远景区,通过矿产地质调查,依据地质、物探、化探、遥感、勘查、科研

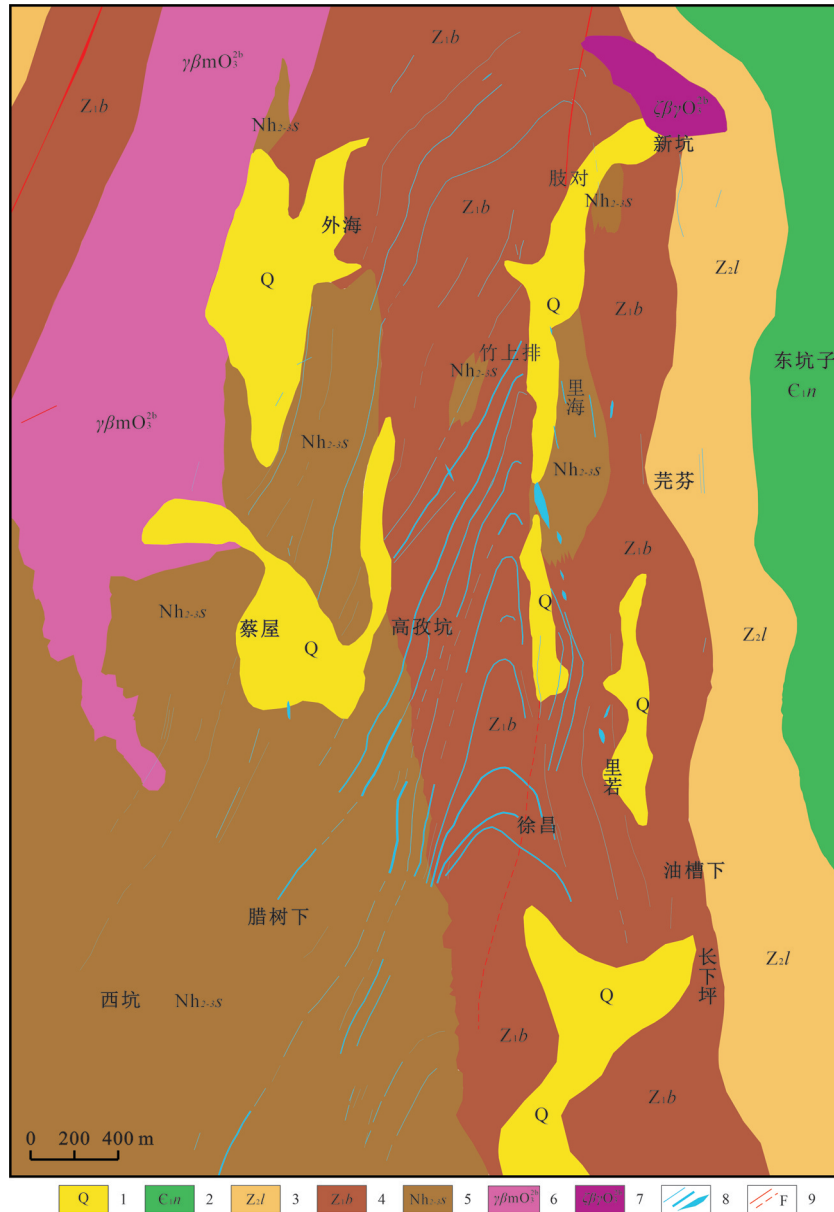


图9 江西省南康市里海铍钽矿床地质简图

1—第四系;2—寒武系牛角河组;3—震旦系老虎塘组;4—震旦系坝里组;5—南华系沙坝黄组;6—加里东期二云母花岗岩;7—加里东期黑云母花岗岩;8—加里东期伟晶岩脉;9—断层

Fig.9 Metallogenic model of the Lihai Nb-Ta-Be deposit in Nankang County, Jiangxi Province

1-Quaternary strata; 2-Late Cambrian Niujiaohe Formation; 3-Late Sinian Laotutang Formation; 4-Middle Sinian Bali Formation; 5-Nanhua System Shabahuang Formation; 6-Late Ordovician two-mica granite; 7-Late Ordovician biotite granite; 8-Late Ordovician pegmatite vein; 9-Faults

等资料,综合分析成矿地质条件和找矿标志,圈定了20处锂铍钽矿找矿靶区(表1,图11),其中已发现中—大型锂铍钽矿床且资源潜力较大的为A类,具有中—大型资源潜力的矿产地为B类,发现重要矿化信息、矿(化)点且具有较好找矿前景为C类。找矿远景区及重要找矿靶区地质信息如下:

5.1 荆竹山—南风面—汤湖找矿远景区

该区位于湘赣交界的荆竹山—南风面—汤湖地区,主要出露寒武系、奥陶系浅变质碎屑岩和泥盆系、石炭系碳酸盐岩及白垩系。花岗岩主要有加里东期和燕山期的南北向诸广山—万洋山岩体。1:20万化探圈出以W、Sn、Bi、Cu、Ag、F、Li为主的综

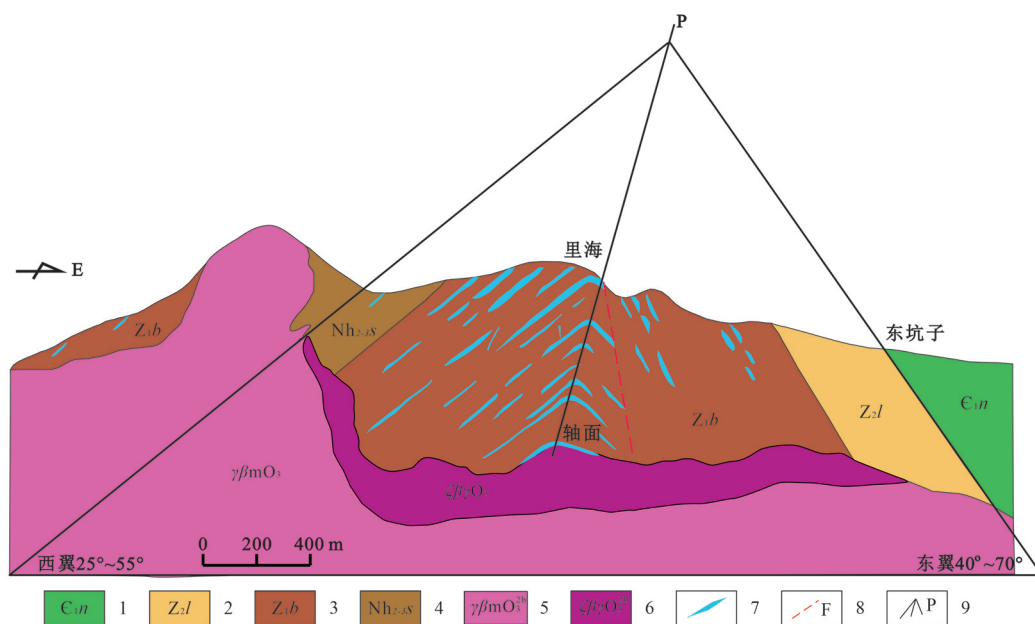


图10 江西省南康市里海铌钽矿床剖面示意简图

1—寒武系牛角河组;2—震旦系老虎塘组;3—震旦系坝里组;4—南华系沙坝黄组;5—加里东期二云母花岗岩;6—加里东期黑云母花岗岩;
7—加里东期含铌(钽)伟晶岩;8—断层;9—褶皱轴面及要素

Fig.10 Section of the Lihai Nb-Ta-Be deposit in Nankang County, Jiangxi Province

1-Late Cambrian Niujianghe Formation; 2-Late Sinian Laohutang Formation; 3-Middle Sinian Bali Formation; 4-Nanhua System Shabahuang Formation; 5-Late Ordovician two-mica granite; 6-Late Ordovician biotite granite; 7-Late Ordovician Be (Nb, Ta)-bearing pegmatite vein; 8-Faults; 9-Fold axis and elements

合异常, W、Sn、Nb、Be、Y、F异常强度高、规模大、套合好,其中湘赣相邻地区的汤湖—南风面—江西坳一带的铍异常以 120×10^{-6} 为下限圈定呈SN向肾状展布 Be(I-1)浓集中心,东西宽约25 km,南北长约70 km,面积达1750 km²,是中国面积规模最大、强度最高的Be异常(图2a)。已知多处铍矿点(巴山村、岩子坑、江西坳、下村、湖洋梗、焦坑等)。已圈定长坪里(A)、荆竹山—白银湖(B)和岩子坑—巴山村(B)3处找矿靶区。

5.2 里海—湖溪—寨头脑地区找矿远景区

该区位于江西里海—大坪—湖溪—寨头脑一带,主要出露地层为震旦系、寒武系、奥陶系浅变质碎屑岩和泥盆系、石炭系碳酸盐岩及白垩系,区内震旦系中有强烈的混合岩化。花岗岩主要有加里东期、燕山期的东西向蔡屋岩体(二云母花岗岩)、大坪岩体(黑云母花岗岩)和弹前岩体。区内分布Be(II)异常。初步圈定里海—大坪—湖溪(A)和寨头脑—红桃仙—龙眼石(B)2个找矿靶区。

里海—大坪—湖溪地区已发现200余条含铍

钽矿的伟晶岩体,含矿伟晶岩脉(体)规模较大,厚度普遍大于1 m,最厚10 m以上,伟晶岩脉主要分布在背斜核部,地表出露沿倾向延伸200 m以上,众多伟晶岩脉在里海一带构成南北大于5 km,东西大于2 km,面积约20 km²的矿化集中区(图10,图11),该处伟晶岩主要为白云母微斜长石伟晶岩、白云母钠长石伟晶岩,并发现了锂辉石伟晶岩脉。测试成果显示该区钠长石伟晶岩脉普遍含铍,且铍矿化稳定、品位较高,并达到工业品位(大于0.05%),局部Nb₂O₅、Ta₂O₅达工业品位,Cd、Ga含量高,局部含矿伟晶岩中Cd达0.2%~1%,Ga达0.002%~0.01%。矿脉中钠长石化、电气石化强烈而普遍发育,铌钽矿化主要与钠长石化关系密切。有用矿物主要有铌钽铁矿、锰铌钽铁矿、铌铁矿、绿柱石、日光榴石、含钽锡石、锂辉石等。2020年在里海实施钻孔验证,深部发现与伟晶岩有关的电气石白云母花岗岩,显示浅部伟晶岩脉为深部加里东花岗岩分异演化形成。结合里若北侧的大坪和湖溪二处铍钽矿化地段,构成了里海—大坪—湖溪大型伟晶岩型铍

表1 南岭东段地区铍钽铌矿找矿靶区一览

Table 1 The prospecting targets districts of Li-Be-Nb-Ta deposits in the East Nanling region

远景区	靶区	靶区特征
湘赣交界荆竹山一南风面一汤湖地区	长坪里找矿靶区(A)	加里东期花岗闪长岩、二长花岗岩和燕山早期第二阶段二云母花岗岩发育,燕山期花岗岩强烈钠化、云英岩化,断裂发育,以东北向压扭性断裂为主,次有NNW向和NWW向断裂;区内分布Be-Cu-Pb-Zn-Sn-Mo-Li组合异常,已发现厚大的云英岩型铍钽铌矿(化)体。
	荆竹山一白银湖找矿靶区(B)	出露地层主要为奥陶系、泥盆系,该区NE向NNE向压扭性断裂发育,其中多呈硅化破碎带,其中见富方铅矿、闪锌矿团块,区内见Sn-Be-Li-Pb-Zn-Cu组合异常,组合异常南侧加里东期花岗闪长岩、二长花岗岩发育。
	巴山村一岩子坑找矿靶区(B)	Cu-Pb-Zn-Sn-Bi-Be浓集中心主要分布于区内加里东期花岗闪长岩,中部有燕山早期细粒二云母花岗岩呈小岩瘤侵入其中,浓集中心北部有NE向压扭性断裂通过,南部有东西向断裂通过。在巴山村、岩子坑一带发现花岗岩钠化、云英岩化十分发育,见蚀变花岗岩型铍钽铌矿化,且规模巨大。
赣县蚊蚣坑一白石一牛角龙地区	牛角龙找矿靶区(C)	出露地层为寒武系牛角河组,受深部岩浆上侵形成的穹隆构造和多期次构造叠加形成跨褶皱构造。1:20万在该处圈定了W-Sn-Pb-Ag异常,该区新发现了牛角龙多金属矿床,并在该矿床探槽揭露中找到了厚度较大的云英岩型钨银铅铋铌钽多金属矿体,显示深部具有“地下室”铍钽铌多金属矿体的找矿潜力。
	蚊蚣坑找矿靶区(C)	在燕山期黑云母花岗岩与寒武系接触带发现多处呈带状分布、规模厚大的层状富云母云英岩带,其中锂、铍、钽铌含量均达到工业品位,显示了寻找蚀变花岗岩型铍钽铌矿的良好前景。
	白石找矿靶区(C)	区内出露主要为震旦系、寒武系,燕山期晚期花岗岩发育,花岗岩中硅化、云英岩化、锂白云母化和黄铁矿化普遍。断裂构造发育。岩体顶部有似伟晶岩发育,花岗岩中有变种锆石、黄玉及浸染状锡石。区内见与地层的延伸方向基本一致的近S-N向椭圆状W-Ag-Au-Be-Bi-Cu-Nb-Li-Mo-Pb-Sn组合异常,有6个与铍钽铌有关的浓集中心。见白石、广孝寺等小型矿床、龟湖钨铜矿点见云英岩型铍钽铌矿体。
兴国宝石村一画眉坳地区	河子背找矿靶区(C)	宝石村一河子背一带混合岩中伟晶岩脉发育,伟晶岩型铍钽铌多金属矿信息丰富,已知河子背伟晶岩型铍钽矿点,该矿点北侧震旦系变质岩中分布有伟晶岩,应深入开展工作。
	左龙寨找矿靶区(C)	区内出露地层为震旦系和寒武系,加里东期黑云母花岗岩和燕山期花岗岩,分布Be-Li-Nb-Pb-Sn-As组合异常,区内铍钽矿(化)点众多,找矿前景良好。
	安福圩找矿靶区(B)	区内燕山早期岩浆活动频繁,已发现有含铍花岗岩伟晶岩及含钽花岗岩2种类型的矿床。该处在花岗岩体顶部气化作用强烈的地段,细小的绿柱石呈浸染状富集于花岗岩中而成为“矿体”,矿体呈极不规则的块状、囊状。该处深部蚀变花岗岩型铍钽找矿前景良好。
里海一湖溪一寨头脑地区	里海一大坪一湖溪找矿靶区(A)	区内出露加里东期二云母花岗岩和加里东期岩体有关的伟晶岩。已发现与加里东期伟晶岩有关的二百余条含铍钽铌矿的伟晶岩体,含矿伟晶岩脉(体)规模较大,众多伟晶岩脉在里海一带构成南北大于5 km,东西大于2 km,面积约20 km ² 的矿化集中区,已发现了锂辉石伟晶岩脉。伟晶岩脉普遍含铍,且铍矿化稳定、品位较高。铍钽矿化主要与钠长石化关系密切。伟晶岩脉中有用矿物主要有铍钽铁矿、锰铍钽铁矿、钽铁矿、绿柱石、日光榴石、含钽锡石、锂辉石等。该靶区位于Be异常发育,具明显三级浓度分带,同时还伴有铍钽铁矿-褐钽铌矿重砂组合异常。
	寨头脑一红桃仙一龙眼石找矿靶区(C)	区内出露寒武系,中部呈岩株状产出燕山早期细粒二云母花岗岩,NEE、NE向断裂发育,为W-Sn-Be-Cu-Mo-Pb-Li组合异常分布区。黑钨矿-锡石-白钨矿-铍钽矿等重砂组合异常发育,已发现红桃仙、寨头脑、龙眼石等多处钨多金属矿点。该处具有蚀变花岗岩型铍钽铌矿的找矿前景。
	崇义一九龙脑一洪水寨找矿靶区(A)	该区Be(I-2)异常发育,以九龙脑一洪水寨近东西向椭圆状浓集中心,三级浓度分带清晰,其中九龙脑一洪水寨浓集中心见高陂山、天华山、内良、吉村等铍钽矿点,及西华山、荡坪伴生铍钽铌矿点,与钨、锡等主要成矿元素高值点吻合较好,与矿点的契合程度较高。铍钽铌主要与钨锡矿体伴生或共生,该区“地下室”、“体中体”式蚀变花岗岩型铍钽铌矿找矿前景广阔,洪水寨、九龙脑见云英岩型铍钽铌矿体。
粤北良源一江西大吉山地区	良源靶区(A)	该区位于龙源坝高分异花岗岩岩体的西端,构造上处于南北向南岭纬向构造-岩浆成矿带上,成矿条件十分有利,已发现了良源大型蚀变花岗岩型铍钽铌钨锂矿床,该矿床是多期次成矿作用形成的多位一体复合矿床,成矿元素众多,矿化复杂,目前该矿区铍钽铌资源量已达大型或超大型规模,但矿体总体规模还未完全控制,显示河渡一杉木地一带地表矿化发育,深部铍钽铌、铅锌银矿化优异,资源巨大。
宁都河源一谷寨地区	谷寨一锯琳池找矿靶区(B)	区内广泛分布震旦系,出露加里东期黑云母花岗岩(会同岩体)。该处加里东期岩浆活动频繁,岩体外围变质岩中伟晶岩型铍钽矿化发育,近年来,矿产地质调查围绕会同岩体找到了河源、谷寨、锯琳池等地伟晶岩型锂辉石矿床(点)。自会同岩体向东北为震旦系变质岩区伟晶岩脉成群分布,已发现4处铍钽铌矿床(点),该区进一步工作有望发现新的伟晶岩型铍钽铌矿床。

续表1

远景区	靶区	靶区特征
赣县九窝—牛岭坳—黄婆地地区	九窝—牛岭坳找矿靶区(A)	该处出露地层为震旦系、寒武系及燕山早期各阶段侵入的花岗岩体,并在局部地段发生了强烈的钠长石化。1:20万化探圈定以W-Sn-Mo-Be为主的组合异常,区内矿点众多,铌钽矿物重砂异常发育。九窝矿点蚀变花岗岩中铌钽含量已接近或超过边界品位。牛岭坳矿区位于岩体接触带,构造复杂、南北向挤压十分发育、沿断裂带有多次岩浆侵入,含矿岩体产于花岗岩体的外带,垂向上为:锂白云母天河石花岗岩—白云母更长石花岗岩—白云母钾长石花岗岩—黑云母碱长石花岗岩分带清晰,矿体呈岩墙侵入于震旦系地层中。矿体上盘常有似伟晶岩覆盖。锂白云母中见黄钽铌矿。
	黄婆地找矿靶区(B)	该区位于加里东期花岗岩和燕山期花岗岩交汇部位,出露地层泥盆系、石炭系和二叠系,1:5万圈定了近百平方公里与铌钽有关的组合异常,相关矿床(点)主要有黄婆地钨矿床;新山铌钽矿、龙潭面钨矿、猪栏门东坑钨矿等,铌钽矿物重砂异常发育。黄婆地钨矿床是石英脉型黑钨矿和矽卡岩型白钨矿共生的复合矿床,新山铌钽矿点位于燕山早期大埠花岗岩体与上泥盆统接触带上,矽卡岩中钨矿化和花岗岩边缘的钠长岩中的浸染型白钨(含铌、钽)矿化,是该区重要的矿化类型,其中铌钽含量很高。
珠栏埠—一大富足—凤凰崇地区	早叫山找矿靶区(A)	该处由燕山早期侵入的中粒似斑状黑云母花岗岩基和一系列后期侵入的岩株和岩瘤所构成。岩石普遍具蚀变交代,钠长石化强烈。并形成了与钠长石化有着密切关系的早叫山铌钽矿床。铌钽矿化主要产于第二、三阶段侵入的小型花岗岩体内,矿体即花岗岩体,铌、钽矿物呈浸染状产出。该处钠长石化广泛发育,而钠长石化发育是该处铌钽矿床的重要找矿标志,推断其深部应有与铌、钽具有成因联系的细粒二云母花岗岩之隐伏岩体存在。
黄地—铜坑埠地区	铜坑埠找矿靶区(B)	Be、Li、Nb、Ta异常都集中于燕山早期三标花岗岩体内,三标花岗岩是一个成矿专属性较特殊的高分异花岗岩岩体,其北见有一系列热液型日光榴石—铅锌矿床出现(黄地),岩体内不同地段Be、Li含量高,根据铌钽异常的空间分布和花岗岩岩性特征,该处蚀变花岗岩型铌钽铌钽矿具有很好的找矿前景。
宁都上流田—白石坑地区	上流田—白石坑找矿靶区(C)	该处出露加里东期石英闪长岩、黑云母花岗岩,广大变质岩区内发育有数百条大小不等的伟晶岩脉,有的成群成组分布,白石坑铌钽矿区外围,发育大量伟晶脉,该区蚀变花岗岩型或花岗伟晶岩型铌钽铌钽资源潜力巨大。

钽矿田,找矿潜力巨大。

5.3 赣县蚁蚣坑—白石—牛角龙地区找矿远景区

区内出露地层主要有南华系、坝里组、老虎塘组,出露岩体主要加里东期黑云母花岗岩和燕山期岩瘤状细—中粒白云母花岗岩、黑云母二长花岗岩及少量石英斑岩、花岗斑岩脉和流纹斑岩。其中岩瘤状细—中粒白云母花岗岩,以细粒结构为主,主要矿物为长石、石英、白云母。与变质岩接触处,局部白云母富集,而具有云英岩的特征。该区总体受兴国旋转构造控制,断裂构造主要有北北东—北东向、东西向、北西向等不同方向的导岩导矿和容矿构造。1:20万化探在圈定了Be元素异常三级浓度分带清晰,1:5万化探圈定了W-Ag-Au-Be-Bi-Cu-Nb-Li-Mo-Pb-Sn组合异常,异常呈近S-N向椭圆状,与地层的延伸方向基本一致。区内主要有牛角龙(C)、白石(C)和蚁蚣坑(C)3个靶区。

5.4 兴国宝石村—画眉坳地区找矿靶区

位于近东西向深大断裂遂川—兴国—石城与两条NE—NNE向深大断裂交汇部位。东为定南—鹰潭、西为大余—南城深大断裂。出露地层以震旦系为主,岩浆岩主要有加里东期黑云母花岗岩、燕

山期黑云母花岗岩和二云母花岗岩,燕山期岩浆活动频繁,含矿岩体发育,含矿岩体周围发育一系列钨锡铍多金属矿床。

分布于该区的Be异常均为NE向,Be元素三级浓度分带清晰,浓集中心近NW向,并伴有Nb(IV)、W、Mo、Bi、Ag元素组合异常。1:20万重砂异常有方山岭铌钽钛矿、杰村铌钽矿、下迳村铌钽族磷钇矿、三寮铌钽矿和黄塘祠铌钽族—磷钇矿异常区。区内矿床(点)众多,其中与铍有关的矿床(点)有画眉坳、芭蕉坑、廖竹窝、雷公地、月形、金龙、朱家山、大坑、佛子泗、牛岗岬、河子背等。该区圈定安福圩(B)、河子背(C)和左龙寨(C)3个找矿靶区。

5.5 宁都河源—谷寨地区找矿远景区

该靶区位于定南—鹰潭东侧NNE向展布,区内广泛分布震旦系,出露加里东期黑云母花岗岩(会同岩体),岩体外围变质岩中伟晶岩型铌钽矿化发育。近年来,矿产地质调查围绕会同岩体找到了河源、谷寨、锯林池等地伟晶岩型锂辉石矿床(点)。自会同岩体向北东为震旦系变质岩区伟晶岩脉成群分布,并出露加里东期付坊岩体,已发现4处铌钽矿床(点),区内谷寨—付坊一带新发现的谷寨、锯

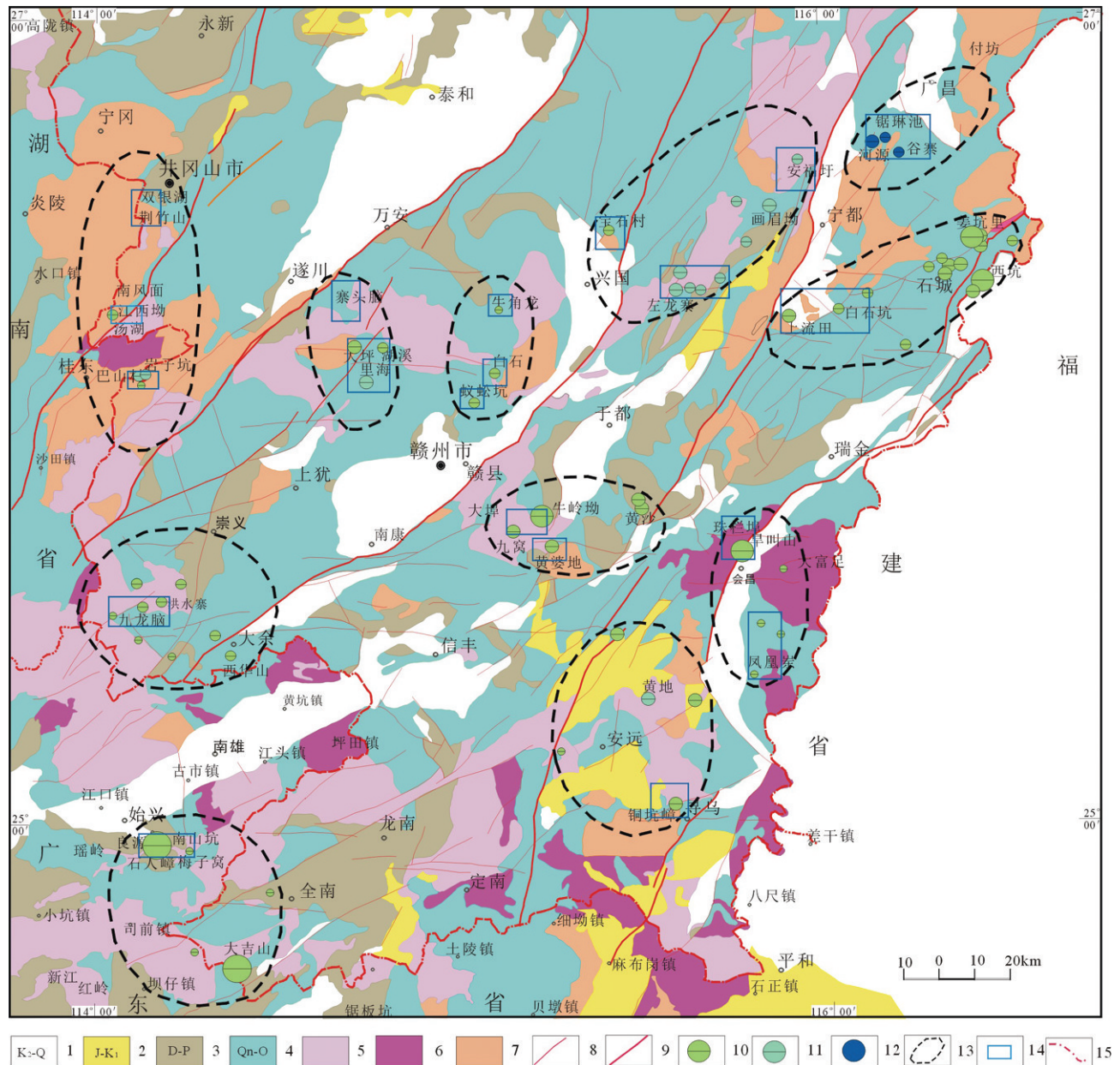


图11 南岭东段地区锂铍铌钽矿地质简图及找矿预测图

1—晚白垩世—第四纪碎屑岩建造(盆地);2—侏罗纪—早白垩世碎屑岩建造、含煤建造、火山熔岩、火山碎屑岩建造;3—泥盆纪—晚二叠世含煤建造、碳酸盐建造、碎屑岩建造及硅质岩、含磷建造;4—青白口纪—奥陶纪复理石建造、硅质岩建造夹火山沉积碎屑岩;5—燕山期侵入岩;6—印支期侵入岩;7—加里东期侵入岩;8—断层;9—重要断裂带;10—铌钽矿床;11—铍矿床;12—锂矿床;13—找矿远景区;14—找矿靶区;15—省界

Fig.11 The prospecting map of Li-Be-Nb-Ta deposits in the East Nanling region

1—The clastic rock formation of Late Cretaceous–Quaternary; 2—The clastic rock, coal-bearing, volcanic lava and pyroclastic rock formation of Jurassic–Early Cretaceous; 3—The coal-bearing, carbonate, clastic rock and siliceous rock and phosphorus-bearing formation of Devonian–Late Permian; 4—The flysch, siliceous rock with volcanic sedimentary clastic rocks of Qingbaikou–Ordovician; 5—The Yanshanian intrusive rocks; 6—The Indosinian intrusive rocks; 7—The Caledonian intrusive rocks; 8—Faults; 9—Important fault zones; 10—Nbium–tantalum deposits; 11—Beryllium deposits; 12—Lithium deposits; 13—Prospecting district; 14—Prospecting targets district; 15—Provincial boundary

林池等矿点资源潜力较大,该区进一步工作有望发现新的伟晶岩型锂铍铌钽矿床。

5.6 崇义—大余地区找矿远景区

该区是南岭东段钨锡多金属矿核心地区,区内锂铍铌钽矿主要以伴生或共生钨锡矿出现。出露地层主要是震旦系—寒武系海相碎屑岩。燕山期花岗岩星罗棋布,分异良好,呈岛屿状分布,成矿与隐伏高分异花岗岩密切相关。矿床类型以石英脉型为主,云英岩型为次,少数为矽卡岩型、破碎蚀变岩型。如著名的西华山石英大脉型钨矿床、漂塘大型细脉型钨矿床等石英脉型钨锡矿床,九龙脑、洪水寨矿区云英岩型锂铍铌钽矿体发育,资源潜力较大。

5.7 粤北良源—江西大吉山地区找矿靶区

该区位于粤赣交界地区,区内广泛出露震旦系—奥陶系,另有少量泥盆系、石炭系、二叠系、白垩系分布,NNE向雩山构造带的南部,与NE向宁都—龙南构造带复合控制本区的构造—岩浆成矿带的展布。构造变形强烈,褶皱断裂发育,长期多阶段构造演化而形成了各具特色的加里东期、海西期—印支期、燕山期构造层。岩体主要有燕山期中粒似斑状黑云母花岗岩、二云母花岗岩、白云母花岗岩、石英斑岩、石英闪长斑岩,和加里东期黑云母花岗岩、花岗闪长岩。该区是重要锂铍铌钽矿集区之一。1:20万化探测量在该区圈出大面积W、Sn、Bi、Pb化探综合异常和W、Sn、Bi重砂异常。Be(I-3)异常三级分带清晰,异常面积大,且与良源、大吉山、红岭等矿床吻合。

良源靶区位于龙源坝高分异花岗岩岩体的西端,构造上处于南北向南岭纬向构造—岩浆成矿带上,成矿条件十分有利。近年来,笔者在该区开展矿产调查,发现了良源大型蚀变花岗岩型铌钽铷铍锂钨矿床^{①②③④}(肖惠良等,2012),该矿床是多期次成矿作用形成的多位一体复合矿床,成矿元素众多,矿化复杂,主要成矿元素有铌钽、铷、铍、锂、钨、锡、钼、铋、铅、锌、银、及稀土等,这些元素均相互伴生或局部富集呈独立矿体出现,目前该矿区云英岩十分发育,局部为富云母云英岩,云英岩中钨锡钼铋铌钽铷铍资源量巨大,但矿体总体规模还未完全控制,河渡—杉木地地表矿化发育,钻探成果显示深部见蚀变花岗岩型钨钼铌钽铍铷矿体和脉状富铅锌银矿体,资源潜力巨大(图7)。

5.8 赣县九窝—牛岭坳—黄婆地地区找矿远景区

区域上地处新华夏系于山构造带与崇义—瑞金东西向构造带交汇部位。断裂构造发育,以NNE向和NE向为主,次为近东西向。出露地层主要为寒武系、泥盆系、石炭系和二叠系,构造有褶皱和断裂,岩浆岩主要为加里东期黑云母花岗岩(马岭岩体)和燕山期大埠高分异花岗岩岩体,主要由中粒似斑状黑云母花岗岩、中—细粒二云母花岗岩、细粒白云母花岗岩以及花岗斑岩脉组成。该区是重要的钨锡铌钽多金属矿化集中区,区内钨、锡、铌钽矿点多,除九窝、黄沙钨矿伴生有铌、钽外,还有牛岭坳、新山等浸染型铌钽矿点。1:20万水系沉积物W、Sn、Be、Nb等元素异常呈东西向宽带状展布,与东西向构造—岩浆—成矿带吻合,Be(V)异常三级浓度分带清晰。1:5万化探测量进一步分解为棕窝、长坑、东埠头、黄婆地和樟水坑等与锂铍铌钽有关的组合异常。区内圈定九窝—牛岭坳找矿靶区(A)和黄婆地找矿靶区(B)。

5.9 珠栏埠—大富足—凤凰寨地区找矿远景区

该区出露地层主要为寒武系、白垩系,岩浆岩主要为加里东期黑云母花岗岩和燕山期珠栏埠—大富足花岗岩体,珠栏埠岩体主要有燕山期第一阶段呈岩基状产出的中粗粒似斑状黑云母花岗岩、第二阶段呈岩株状产出的中细粒黑云母花岗岩和第三阶段呈岩瘤状产出的细粒二云母花岗岩组成,此外尚有伟晶岩、细晶岩和辉绿玢岩等脉岩侵入。1:20万化探异常发育,W、Sn、Nb、Ta异常呈面型展布,Be(VI)异常总体呈NE向分布,浓集中心(VI-1)对应早叫山、大富足,浓集中心(VI-2)对应凤凰寨铌钽矿点,异常组合为Be-Y-Zr-Yb-Li。该处以铌钽铁矿为主的重砂异常多,规模大。区内圈定早叫山找矿靶区(A)和永隆—凤凰寨找矿靶区(C)。

5.10 黄地—铜坑嶂地区找矿远景区

该区位于安远—会昌—寻乌三县交界地带,处于NE、NNE和EW、NS向构造带的交界部位,出露地层主要为寒武系和上侏罗统火山岩,岩浆活动频繁,主要有加里东期黑云母花岗岩、燕山早期第二阶段黑云母花岗岩和燕山晚期花岗岩等,构造复杂,该区处于SN、NNE、NE和EW向构造带复合地段。该区矿点有高埠背钨矿点、银梗垅铅铜矿点,木背坑铅锌矿点,佛林沙铅锌矿点,黄地铍铅锌矿

床等。区内与铌钽铍有关的1:20异常主要有古头垵Be-Li-Zr-Nb-Ta-Y组合异常、铜锣丘铍-铌-锂异常、Be(VI)异常的VI-2、VI-3浓集中心分布对应黄地—铜坑嶂和马头寨。同时1:20万铌钽重砂异常也与之吻合。

5.11 宁都上流田地区找远景区

该区位于武夷山隆起带西坡永平—寻乌NNE向断裂带上,出露地层为震旦系浅变质岩系。变质岩区内发育有数百条大小不等、成群成组分布的伟晶岩脉,区内构造以东西向、NE向和NNE向压扭性断裂为主,并控制区内含矿岩体的展布。岩浆岩为燕山晚期中细粒黑云母花岗岩和中粒铁锂云母化、钠长石化花岗岩,含矿岩体为中浅成岩体,地表呈NNE向串珠状分布向深部归并为岩株,矿化花岗岩自变质(钠长石化、钾长石化)、气热蚀变(云英岩化、铁锂云母化等)作用强烈,其中钠长石化、云英岩化和铁锂云母化与铌钽矿化关系密切。矿化岩体具明显的岩相分带,从岩体边缘向中心,从上而下可分为:似伟晶岩带→云英岩带→富钠长石、铁锂云母花岗岩带→钠长石、铁锂云母花岗岩带→少钠长石、铁锂云母黑磷云母花岗岩带。已知矿床矿石类型主要为浸染状矿石,铌、钽主要矿物为铌钽铁矿、锰钽铁矿、细晶石、铁锂云母和锂云母等。

6 讨论

6.1 南岭东段两类铌钽铍矿花岗岩—伟晶岩成矿流体特征

南岭东段蚀变花岗岩型Nb-Ta-Li-Be-Rb矿床主要形成W-Sn矿中,呈伴生或共生Nb-Ta-Li-Be-Rb矿(如大吉山、良源、江西坳、西华山、漂塘、画眉坳、九窝、新山、巴山村、下村、蜈蚣坑等),在时空上主要与燕山期高分异花岗岩密切相关,蚀变花岗岩型铌钽铍矿与石英脉型钨锡伴生铌钽铍矿,往往是同一成矿期略有先后的两种矿化形式;南岭成矿带东段伟晶岩型Li-Be-Nb-Ta矿主要分布在河源—谷寨、里若—大坪—湖溪、汤湖—南风面—荆竹山等地,主要有里若铌钽铍矿床、河源锂辉石矿床、谷寨锂辉石矿床、锯琳池锂辉石矿等。在时空上主要与加里东期花岗伟晶岩密切共生。Cerny et al.(2012)将与稀有金属矿化有关的伟晶岩主要划分为LCT型(富集Li、Cs和Ta)和NYF型(富

集Nb、Y和F)2大类,LCT型伟晶岩形成于俯冲或后碰撞环境(Tkachev, 2011),大多具有与S型花岗岩类相似的化学成分特征;NYF型伟晶岩大都来源于A型花岗岩,化学成分中富集HREE、Ti、U、Th, Nb>Ta。这2种伟晶岩反映了母岩浆结晶过程的不同,对于LCT型,岩浆自下而上结晶;对于NYF型,岩浆则从外往里结晶(London, 2005)。南岭东段地区含矿伟晶岩以LCT型为主。

6.1.1 南岭东段燕山期蚀变花岗岩型铌钽铍矿成矿流体

对于地壳中分布量很低的钨锡、铌钽铍等稀有元素来说,成矿作用往往在岩浆分异演化高峰阶段富集成矿。南岭东段地区燕山期花岗岩浆的分异演化程度也不完全一致,与其有关的矿化特征及矿化强度也有一定差异。

由于强烈的结晶分异作用,燕山期花岗岩浆最后结晶的熔体位于Q-Ab-Or花岗岩体系的最低共结点附近,即在主要矿物组成上以石英、钾长石和钠长石(或富钠斜长石)为主。与正常类型花岗岩相比,高分异花岗岩中的钾长石多为微斜长石,甚至出现天河石(富铷钾长石);斜长石逐渐减少,并向富钠方向演化。通常的I-或S-型花岗岩,角闪石或辉石的强烈结晶与分离,会导致岩石向富铝方向演化(即铝饱和指数增加),从而出现较多的白云母和石榴石(锰铝榴石)。另一方面,随着分异作用的不断进行,岩浆中H₂O、Li、F、B、Cl和P等挥发分不断增加,从而出现锂云母、锂辉石、透锂长石、萤石、黄玉、电气石和磷灰石等特征矿物(因而又称之为Li-F花岗岩)(朱金初等,2002)。在岩浆演化的不同阶段,电气石的成分会呈现一定的变化。早期的电气石含较多的Mg和Fe,而高度演化的花岗岩浆有可能晶出铝含量高的锂电气石。就云母而言,它在岩浆演化过程中,依次从镁质黑云母、镁铁质黑云母、铁质黑云母,向锂铁云母和锂云母方向演化(李洁和黄小龙,2013;Li et al., 2015)。因此,钠长石、锂电气石、锂云母或含锂白云母的出现是高分异花岗岩最重要的造岩矿物学标志。

对于具体岩体来说,岩浆演化往往从一个高峰向另一个高峰波浪式发展,岩浆演化的高峰不一定在最晚阶段,而且有时出现几个相对高峰阶段和相应的成矿作用。岩浆演化较为完善的侵入阶段,一般具有从

黑云母花岗岩→二云母花岗岩→白云母花岗岩→细晶岩(脉)或伟晶岩脉→含矿(长石)石英脉的发展过程。岩浆演化晚期导致浅色碱性含石榴石二云母或白云母花岗岩和细晶岩(脉)的出现。这种演化特征的花岗岩类,钨锡钼铋、铍铌钽等成矿元素矿化相对较强,并与其副矿物含量较高相一致,其中以燕山早期第二、三两个阶段为代表。反映岩浆演化具有复杂的酸-碱交替变化特点,其总的趋势是往酸性、碱度增高方向发展。可见,岩浆分异演化完善程度与钨锡钼铋、铍铌钽等稀有元素的成矿有着密切关系,也是判别成矿岩体和非成矿岩体的重要标志。富含碱金属、挥发分高酸富碱贫暗色组分的花岗岩浆高分异演化,对钨锡钼铋、铍铌钽等成矿元素矿化较为有利,从岩浆中分出或经碱质交代有部分成矿元素在一定条件下发生沉淀。

成矿流体的形成与燕山期含矿花岗岩浆的分异演化机制密切相关,是成岩-成矿连续不断分异演化的产物。伴随每个阶段岩浆侵入,均有分异演化成矿的可能。携带钨锡钼铋、铍铌钽等成矿元素的碱金属挥发组分等也主要来自花岗岩浆,而也只有岩浆演化具备使碱金属和挥发分从岩浆中分离出来,才能将钨锡、铍铌钽等成矿元素一起带出来。

由于燕山期成矿花岗岩浆的演化机制的不同,成矿流体的形成过程也有一定的差异。从岩浆分离出来的碱性硅酸盐挥发分、碱金属、成矿元素流体,又经历了重熔分异一系列复杂演化过程,促使成矿物质不断集中,并在冷却下的“气热沸腾”过程中,与岩浆最后彻底分离。即经过成矿物质萃取—演化、富集—分离3个较完整的连续演化过程。这种成矿流体形成的矿床一般矿化较强规模相对较大。

在岩浆结晶分异过程分离出来的酸碱性组分,虽然富集一定数量的成矿物质,但与含有大量硅质的成矿流体还有较大的区别,其中包含着一定数量的硅酸盐熔体,并且仍处于相对分散状态。经岩浆结晶晚期碱质交代作用,一方面残余溶液中的碱质(主要是钾)被消耗另一方面大量硅质从原岩中被带到残余溶液中,在一定条件下,也有部分钨锡钼铋、铍铌钽等成矿元素从原岩矿物中被释放出来后转入残余溶液。从而促进了残余溶液迅速往硅质及富含挥发组分与成矿物质方向发展。

当残余溶液中碱质大量消耗,如碱质交代,随

后熔体-溶液逐渐酸化,当酸度增高到一定程度,在富含挥发分、碱金属和成矿物质的硅质熔体或溶液聚集地段,可能出现浸染型钨锡、钼、铋、铍钽矿等浸染型矿化。在钾(钠)质交代末期,往往出现云英岩化或白云母化,从而有利于铍铌矿物的沉淀。

富钽花岗岩体往往都是燕山期高分异花岗岩岩体晚期晚阶段的侵入产物,钽矿体位于岩体的顶凸部位,矿体的上部边界与花岗岩体边界一致。成矿岩体空间分带明显,在其顶部都不同程度地发育似伟晶岩壳。富钽花岗岩在岩石学、矿物学及成岩成矿条件等方面具有一系列特点。这类矿床,一般规模较大,品位均匀,主要钽铌矿物除了钽铁矿-钽铁矿族矿物外,一般都有数量不等的高钽矿物(细晶石)。除钽之外,还有铌、锡、钨、锂、铷、铯等。

6.1.2 南岭东段加里东期花岗伟晶岩型铍铌钽矿成矿流体

地球上存在各种类型的伟晶岩。学者们认为伟晶岩成因主要有与岩浆作用有关的岩浆结晶分异、交代成因模式(邹天人和徐建国,1975;袁见齐等,1985;London,2005,2009)和与变质作用相关的变质深熔与变质分异成因模式(Shmakin,1983)2种。

按照结晶分异的观点,与岩浆作用有关的岩浆结晶分异成因模式,由于挥发性组分和稀有金属的不相容性,随着早期晶体的析出,逐渐在残余熔体中富集,直至最后结晶成脉(Evensen and London,2002,2003)。Evensen and London (2002)通过Be的熔体/矿物分配系数,表明在地壳重熔形成花岗岩时,堇青石等难熔矿物将阻止Be进入熔体,随后在熔体演化过程中,由于Be与各矿物间的低熔体/矿物分配系数,早期熔体中Be轻微富集,而当80%的熔体结晶后,岩体顶部的Be溶液达到 $10 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$,由此分异的伟晶岩Be浓度 $>70 \times 10^{-6}$ 。

Shear et al. (1992)提出母岩浆连续结晶形成伟晶岩的模型,认为岩石圈经部分熔融后形成均一的岩浆或者不均一岩浆在岩浆房达到均一化,此后母岩浆的连续结晶作用形成较宽的花岗岩分带现象,低程度的结晶分异作用形成黑云母花岗岩,而高程度的结晶分异作用则形成富稀有金属的岩浆,该模式与许多岩浆分异成因伟晶岩脉的分带模式相近。从蚀变花岗岩型→伟晶岩型→热液型铍铌钽矿床往往有连续的岩浆-热液演化关系。因此,伟晶岩脉的母岩对于

寻找伟晶岩稀有金属矿产以及建立完整的花岗岩-伟晶岩系统演化模式具有重要意义。

通常认为岩浆成因的花岗伟晶岩脉为花岗质熔体极度分异的产物。区域上分布的伟晶岩脉群往往围绕某一岩体分布。不少伟晶岩田的母岩,除了在岩性成分和副矿物组合上与周围的伟晶岩相近似外,在结构上还出现了一些很特别的不均匀现象,表现在有伟晶状与细晶状浅色花岗岩呈交替互层分布,如加拿大Manitoba东南部的温尼伯河伟晶岩田、美国南达柯大Back Hills伟晶岩田、美国科罗拉多的Quartz Greek伟晶岩田和中国北秦岭伟晶岩田。这或许是由于从母岩浆顶部派生出伟晶岩浆过程中因挥发分逸出引起液相线固相线温度提高而形成细晶结构花岗岩,而残留有挥发分的部位构成伟晶状花岗岩,这反映了母岩浆顶部,挥发分逸失和局部残留的动荡环境。从母岩体向外,伟晶岩脉群在矿物组成、内部结构、微量元素和矿化特点等方面呈现系统变化,而显示区域分带性。世界上许多大的稀有金属伟晶岩田都有这种区域分带。如果称靠近母岩体的一系列伟晶岩脉为近带(或下部带),远离母岩体的一系列伟晶岩脉为远带(或上部带),那么从近带到远带,窄的几百米,宽的可达几千米至十余千米,甚至几十千米。

在伟晶岩脉发育地区,虽然以富Li、Na₂O、F,富钠长石、含锂辉石、锂云母以及钽铁矿、锡石、铯榴石等稀有金属矿物为特征的Li、Na(F)伟晶岩占的比例很小,但却是最富含Li、Rb、Cs、Ta、Sn、Hf等稀有金属的伟晶岩。Li、Na(F)伟晶岩离母岩体很远,与Li、Na(F)伟晶岩接触的一般为含白云母的伟晶岩,常位于其内核部位,甚至可呈不规则脉状体切割白云母伟晶岩。Li、Na(F)伟晶岩内部还呈现分带现象,一般锂辉石靠边,锂云母靠内侧,铯榴石位于核部。有时还显示垂直分带,较粗的钠长石(及红色电气石)位于顶部,细晶钠长石位于底部(陈西京,1976)。花岗伟晶岩中锂、铷趋向在锂辉石伟晶岩中富集,钽、铌和铍趋向在钠长石伟晶岩中富集。

与变质作用相关的变质深熔与变质分异成因模式,变质深熔的观点即是富锂变质沉积岩部分熔融,在低于浅色花岗岩最低温度下形成富锂岩浆,伟晶岩和相关花岗岩是同一深熔事件不同阶段的产物(Shmakin,1983)。区域沉积岩在遭受变质作

用和混合岩化作用后,发生脱水脱碳等化学反应,分异出大量富含碱性和挥发性组分的变质流体,该流体沿层理、面理、片理及裂隙断裂充填,经重结晶及交代作用形成(Ramberg,1952)。许多国外学者在古老结晶地层中发现许多形成于退变质阶段的伟晶岩,认为伟晶岩受变质相的温度和压力制约,不同类型的(不同深度形成的)伟晶岩,往往与不同的变质相带相对应(Ramberg,1952,1956)。他们认为在低于花岗岩最低熔融点下,富锂的沉积岩部分熔融产生富锂的熔体,熔体沿区域变质梯度从无锂或贫锂的伟晶岩脉及相关的花岗岩演化向富锂伟晶岩脉演化;伟晶岩脉是低程度部分熔融的产物,而相关的花岗岩则是高程度部分熔融的结果,从而形成花岗岩体和伟晶岩脉的区域分带性。

6.2 加里东花岗岩与燕山期锂铍铌钽成矿关系

众所周知,南岭乃至华南地区最大规模成矿作用主要与燕山期花岗岩有密切的成因关系(中国科学院地球化学研究所,1979;莫柱孙和叶伯丹,1980;华仁民和毛景文,1999;毛景文等,1999,2007;华仁民等,2005)。南岭东段加里东期的花岗岩类在强度和广度上仅次于燕山期花岗岩,近年来随着该区花岗岩类研究的不断深入,与加里东期花岗岩有关的成矿作用取得了大量新的成果(华仁民等,2013)。笔者在南岭东段的矿产调查中发现,凡有锂铍铌钽矿化富集的地段或附近,均有加里东花岗岩类存在,加里东期花岗岩类不仅直接分异演化形成伟晶岩型锂铍铌钽矿床,同时还为燕山期蚀变花岗岩型和石英脉型锂铍铌钽矿床成矿提供物质来源。

6.2.1 加里东期花岗岩直接成矿形成锂铍铌钽矿床

笔者最近在里海伟晶岩型锂铍铌钽矿区研究的最新成果显示,里海伟晶岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为(443±12)Ma(未发表数据)。钻探深部显示里海伟晶岩型锂铍铌钽矿床深部电气石白云母二长花岗岩与伟晶岩呈过渡渐变关系,且与矿区西侧的蔡屋二云母花岗岩岩体同源,由此可见,加里东期花岗岩分异演化直接形成锂铍铌钽矿床。会同岩体((425.8±6.2)Ma,崔圆圆等,2013)是河源伟晶岩型锂矿床、谷寨伟晶岩型锂矿床、锯琳池伟晶岩型锂辉石矿床成矿母岩,也是加里东期花岗岩直接成矿。

6.2.2 加里东期花岗岩类为后期岩浆成矿作用提供成矿物质

如湘赣交界的万洋山—诸广山地区、粤北龙源坝地区,该区是华南地区铍的高异常分布区,这些地区同时也是加里东期花岗岩和燕山期高分异花岗岩分布区(伍光英等,2008;刘静等,2015;方贵聪等,2017),区内铍钨钽矿点分布众多,新发现的广东始兴良源铍钨钽矿床、江西坳铍钨钽矿、岩子坑铍钨钽矿床、巴山村铍钨钽矿等显示区内与高分异花岗岩有关的蚀变花岗岩型铍钨钽矿床均有加里东期成矿物质的加入。笔者在广东良源铍钨钽矿床矿体深部(ZK301钻孔岩心)获得细粒黑云母二长花岗岩的SHRIMP锆石U-Pb年龄为(416±4) Ma,为加里东期(未发表数据),而浅部(ZK303钻孔岩心)白云母花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb锆石年龄为(161±1.7) Ma,岩体顶部云英岩矿体的6颗单颗粒SHRIMP锆石U-Pb锆石年龄2次测试结果分别为:(479.6±10.5) Ma、(151.0±7.3) Ma、(160.3±3.4) Ma、(163.4±6.8) Ma、(158.8±6.2) Ma、(319.7±19.2) Ma^⑨。显示燕山期成矿作用中加里东期成矿物质的加入。由此可见,当燕山期花岗质岩浆上侵交代加里东期围岩发生热液成矿作用时,加里东期花岗岩类中的铍钨钽就为燕山期成矿提供了部分来源。

6.2.3 印支期铍钨钽矿成矿作用探讨

区内从加里东期到燕山期花岗岩的演化规律性并不明显。区内加里东期花岗岩与燕山期花岗岩较为相似,在岩石学、岩石化学、微量元素等方面,与钨矿有关的燕山期花岗岩的特征极为相近,而且具有从黑云母花岗岩向白云母花岗岩演变的规律性,且有高酸富碱贫暗色组份的特征,而与印支期花岗岩则有明显的不同(吴永乐等,1987)。

由于区内印支期花岗岩岩体数目和总出露面积不大,岩体较分散,且无明显带状性。印支期花岗岩的成分、结构构造和组合,与燕山早期同类型花岗岩几乎没有区别。在岩性上有两类:一类是强过铝浅色花岗岩,含白云母、石榴石、电气石等高铝矿物,不含堇青石;常与铀成矿有关;全岩ACNK>1.10,稀土元素配分曲线常显示不同程度M型四分组效应,是富卤族元素流体与熔体反应的结果;基本不含岩石包体。另一类花岗岩是弱过铝或准铝的,可含角闪石,常含由岩浆混合作用形成的暗色岩石包体。两类印支期花岗岩可以各自独立产出,也可共存。近

年来,与印支期花岗岩有关的成矿作用也有较多报道(华仁民等,2013),但总的来说,矿化较弱,至于该区铍钨钽为何会跨过该阶段的成矿而在燕山期富集,其中原因,目前尚不清楚。

6.3 南岭东段锂成矿潜力探讨

在南岭东段地区花岗岩、伟晶岩型稀有金属矿床中,铍钨钽金属矿产往往共伴生在一起,也经常出现铍钨钽分别成矿或其中几个共伴生成矿的现象,或者锂、铍、钨、钽跟其他矿种共伴生的情况。按矿石类型南岭东段地区锂矿分为锂辉石、锂云母共(伴)生锂两大类;锂辉石共(伴)生锂资源类型矿床主要与加里东期伟晶岩有关,已发现河源锂辉石矿、头陂西港锂辉石矿、谷寨锂辉石矿床和里海铍钨钽矿;锂云母共(伴)生锂资源类型矿床主要与燕山期高分异花岗岩有关,主要包含良源、大吉山、姜坑里、海罗岭等。然而相对于铍钨钽,南岭东段地区锂的成矿似乎最弱。

中国锂地球化学调查显示,华南地区侵入岩中加里东期、喜马拉雅期、印支期和燕山期锂含量明显高于其他期次;沉积地层中泥质岩类锂含量最高,平均含量达 50×10^{-6} ,是地壳克拉克值的4倍。南岭东段是华南锂地球化学异常的浓集中心区,以 53.6×10^{-6} ,圈定的北东向锂异常横贯全区,区内锂矿具有较好的找矿潜力(王学求等,2020)。

笔者在区内锂矿床中调查发现,含锂辉石和含锂云母的矿石样品的分析显示,在表生作用中,锂的地球化学性质比较活泼,地表样品中,无论是伟晶岩中的锂辉石还是蚀变花岗岩中的锂云母,在表生作用下均流失严重,发生迁移。

近年来随着国内外盐湖卤水型锂矿的开发利用,区内已发现多处盐湖卤水型锂矿信息。南岭东段地区在白垩纪形成多个湖泊相沉积的红色碎屑岩盆地,包括于都、赣州、泰和、兴国、宁都、会昌、瑞金、南雄等盆地。性质以断陷盆地为主,受NE—NNE向断裂控制,总体呈NE向展布。区内部分盆地的卤水中LiCl品位达盐湖含锂卤水工业品位,如吉泰盆地发现的卤水矿体中,卤水盐度190~330 g/L, Li含量高达102.7 mg/L, LiCl含量611~1136 mg/L;赣州盆地发现的卤水中Li⁺含量可达75.2 mg/L (ZK9)、50 mg/L (ZK20),平均值为62.6 mg/L,换算为LiCl,可达工业品位;会昌盆地周田岩盐矿床岩盐矿石中平均LiCl 0.0333%,

最高约0.1%,最低约0.01%。

红盆中的锂主要来源于周边含锂的燕山期花岗岩和加里东期花岗伟晶岩。吉泰盆地周边燕山期花岗岩中含Li为 $28.07 \times 10^{-6} \sim 330.90 \times 10^{-6}$,平均 112.88×10^{-6} 可见,燕山期花岗岩因其锂含量很高,对卤水锂的贡献最大(刘成林等, 2021)。

因此,该区白垩系盆地具有寻找含锂卤水矿床的潜力。

7 结 论

(1)南岭东段铍铌钽矿床成矿条件优越,资源潜力巨大,找矿前景优异,本次研究划分11处找矿远景区,并在此基础上,优选了20个(6个A级、6个B级、8个C级)找矿靶区。

(2)该区铍铌钽矿床主攻矿床类型以蚀变花岗岩型和伟晶岩型为主,兼顾石英脉型。

(3)南岭东段铍铌钽矿找矿勘查中,建议对良源、里海—大坪—湖溪、九龙脑—洪水寨、旱叫山、九窝—牛岭坳和长坪里等6个A级找矿靶区优先开展预查和普查工作,以期早日实现该区铍铌钽矿找矿新的重大突破。

(4)南岭东段地区白垩纪形成了北东向湖泊相沉积的红色碎屑岩盆地,已发现多处含锂卤水矿床的信息,也是寻找卤水型锂矿的重要远景区。

注释

①肖惠良,陈乐柱,鲍晓明,范飞鹏,周延,姚正红,武玲,蔡逸涛,滕龙. 2013. 广东始兴—连平地区钨钼多金属矿调查评价成果报告[R]. 南京:南京地质调查中心, 1-231.

②肖惠良,陈乐柱,范飞鹏,鲍晓明,李海立,蔡逸涛,姚正红,周延,滕龙. 2016. 广东始兴南山坑—良源地区钨锡多金属矿调查评价成果报告[R]. 南京:南京地质调查中心, 1-181.

③肖惠良,陈乐柱,范飞鹏,李海立,鲍晓明,姚正红,蔡逸涛,周延,滕龙,张洁. 2017. 江西全南—广东始兴地区钨锡、稀有、稀土金属矿产调查评价成果报告[R]. 南京:南京地质调查中心, 1-260.

④肖惠良,陈乐柱,李海立,范飞鹏,方捷,周延,隰弯弯. 2020. 南岭成矿带东段重要矿种成矿要素调查成果报告[R]. 南京:南京地质调查中心, 1-326.

⑤肖惠良,陈乐柱,鲍晓明,周延,范飞鹏,武玲,吴涵宇,马明,姚政红. 2009. 湘赣粤相邻地区钨矿远景调查成果报告[R]. 南京:南京地质调查中心, 1-221.

Reference

Cerny P, Scott T. 2005. The classification of granitic pegmatites

revisited[J]. *Canadian Mineralogist*, 43(6): 2005–2026.

Cerny P, London D, Novak M. 2012. Granitic pegmatites as reflections of their sources[J]. *Elements*, 8: 289–294.

Chen Jun, Lu Jianjun, Chen Weifeng, Wang Rucheng, Ma Dongsheng, Zhu Jinchu, Zhang Wenlan, Ji Junfeng. 2008. Tungsten tin niobium tantalum granite and its mineralization in Nanling area[J]. *Journal of Geology of Colleges and Universities*, 14(4): 459–473 (in Chinese with English abstract).

Chen Xijing. 1976. Deep-seated magmatic differentiation and the formation of granite pegmatites in a certain district, China[J]. *Geochimica*, 3(5): 214–229 (in Chinese with English abstract).

Chen Yuchuan, Pei Rongfu, Zhang Hongliang, Lin Xinduo, Bai Ge. 1989. *Geology of Nonferrous and Rare Metal Deposits Related to Mesozoic Granitoids in Nanling Area*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–506 (in Chinese).

Chen Yuchuan, Wang Denghong, Xu Zhigang, Huang Fan. 2014. Outline of metallogenic regularity of South China and Mesozoic magma[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(2): 219–229 (in Chinese with English abstract).

Cui Yuanyuan, Zhao Zhidan, Jiang Tin, Yang Jinbao, Din Cong, Sheng Dan, Hou Qinye, Hu Zhaochu. 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).

Evensen J M, London D. 2002. Experimental silicate mineral/melt partition coefficients for beryllium, and the beryllium cycle from migmatite to pegmatite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66: 2239–2265.

Evensen J M, London D. 2003. Experimental partitioning of Be, Cs, and other trace elements between cordierite and felsic melt, and the chemical signature of S-type granite[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144: 739–757.

Fang Guichong, Chen Zhenghui, Chen Yuchuan, Zhao Zheng, Hou Kejun, Zeng Zhanlin, Luo Ze. 2017. Two petrogenetic stages of Dabu composite granite pluton in South Jiangxi and their geological implications[J]. *Mineral Deposits*, (6): 1415–1424 (in Chinese with English abstract).

Guo Aimin, Chen Bihe, Chen Jianfeng, Zhou Chao, Si Chengshan, Zheng Zhenfu. 2017. Zircon SHRIMP U–Pb geochronology of granitoids from northern Zhuguangshan granitic composite batholith, Hunan Province[J]. *Geology in China*, 44(4): 781–792 (in Chinese with English abstract).

Hua Renmin, Mao Jingwen. 1999. A preliminary discussion on the Mesozoic metallogenic explosion in East China[J]. *Mineral Deposits*, 18(4): 300–308 (in Chinese with English abstract).

Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, Lu Jianjun. 2005. Three major metallogenic events in Mesozoic in South China[J]. *Mineral Deposits*, 24 (2): 99–107 (in Chinese with English abstract).

Hua Renmin, Zhang Wenlan, Chen Peirong, Zhai Wei, Li Guanglai. 2013. Relationship between Caledonian granitoids and large-scale

- mineralization in South China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 19(1): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science. 1979. *Geochemistry of Granitoids in South China*[M]. Beijing: Science Press, 1–421 (in Chinese).
- Li Jiankang, Li Peng, Wang Denghong, Li Xingjie. 2019. A review of niobium and tantalum metallogenic regularity in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 64: 1545–1566 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Zou Tianren, Wang Denghong, Ding Xin. 2017. A Review of beryllium metallogenic regularity in China[J]. *Mineral Deposits*, 36(4): 951–978 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiangkang, Zou Tianren, Liu Xifang. 2015. The metallogenic regularities of lithium deposit in China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89: 652–670.
- Li Jie, Huang Xiaolong. 2013. Mechanism of Ta–Nb enrichment and magmatic evolution in the Yashan granites, Jiangxi Province, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29: 4311–4322 (in Chinese with English abstract).
- Linnen R L, van Lichtenvelde M, Černý P. 2012. Granitic pegmatites as sources of strategic metals[J]. *Elements*, 8: 275–280.
- Linnen R L, Samson I M, Williams–Jones A E, Chakhmouradian A R. 2014. Geochemistry of the rare–earth element, Nb, Ta, Hf and Zr deposits[J]. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 13: 543–568.
- Liu Chenlin, Yu Xiaoxian, Yuan Xueyin, Li Ruiqin, Yao Fojun, Shen Lijian, Li Qiang, Zhao Yuanyi. 2021. Characteristics, distribution regularity and formation model of brine–type Li deposits in salt lakes in the world[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(7): 2009–2029 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jing, Zhang Zhanshi, Wu Yi, Meng Lei, Shao Fei, Chen Rui. 2015. Age dating of Dabu pluton and its geological implication in South Jiangxi[J]. *World Nuclear Geoscience*, 32(2): 101–106 (in Chinese with English abstract).
- London D. 2005. Granitic pegmatites: An assessment of current concepts and directions for the future[J]. *Lithos*, 81: 281–303.
- London D. 2009. The origin of primary textures in granitic pegmatites[J]. *The Canadian Mineralogist*, 47: 697–724.
- Maitre R W L. 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1–193.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids[M]. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635–643.
- Mao Jingwen. 1997. Metallogenic speciality of super giant polymetallic tungsten deposit: Taking the Shizhuyuan deposit as an example[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 32(3): 351–363 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Hua Renmin, Li Xiaobo. 1999. A preliminary study of large scale metallogenic and large clusters of mineral deposits[J]. *Mineral Deposits*, 18(4): 291–299 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqin, Guo Chunli, Chen Yuchuan. 2007. Large–scale tungsten–tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2329–2338 (in Chinese with English abstract).
- Mo Zhusun, Ye Bodan, Pan Weizu, Jiang Shaomian, Zhuang Jinliang, Gao Bingzhuang, Liu Jinquan, Liu Wenzhang. 1980. *Nanling Granite Geology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–363 (in Chinese).
- Nakada S, Takahashi M. 1979. Regional variation in chemistry of the Outer Zone and the Setouchi province of southwest Japan[J]. *Journal of the Geological Society of Japan*, 85: 571–582.
- Qin Zhengwei, Fu Jianming, Xing Guangfu, Cheng Shunbo, Lu Youyue, Zhu Yingxue. 2022. The petrogenetic differences of the Middle–Late Jurassic W–, Sn–, Pb–Zn–Cu–bearing granites in the Nanling Range, South China[J]. *Geology in China*, 49(2): 518–539 (in Chinese with English abstract).
- Ramberg H. 1952. *The Original of Metamorphic and Metasomatic Rocks*[M]. Chicago: Chicago University Press.
- Ramberg H. 1956. Pegmatite in west Greenland[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 67(2): 185–213.
- Ren Jishun, Yang Weiran. 1998. *Tectonic Framework and Geodynamics Evolution of Eastern China*[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1–12 (in Chinese).
- Rollinson H. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*[M]. London: Longman Scientific and Technical, 52–61.
- Shearer C K, Papike J J, Jolliff B L. 1992. Petrogenetic links among granites and pegmatites in the Harney Peak rare–element granite system, Black Hills, South Dakota[J]. *Canadian Mineralogist*, 30: 785–809.
- Shmakin B W. 1983. Geochemistry and origin of granitic pegmatites[J]. *Geochemistry International*, 20: 1–8.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle compositions and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 42: 313–345.
- Tkachev A V. 2011. Evolution of metallogeny of granitic pegmatites associated with orogens throughout geologic time[J]. *Geological Society London Special Publications*, 350: 7–23.
- Wang Denghong, Chen Yuchuan, Chen Zhenghui, Liu Shanbao, Xu Jianxiang, Zhang Jiajing, Zeng Zhailin, Chen Fuwen, Li Huaqin, Guo Chunli. 2007. Assessment on mineral resource in Nanling region and suggestion for further prospecting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 882–890 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Chen Zhenyu, Huang Fan, Wang Chenghui, Zhao Zhi, Chen Zhenghui, Zhao Zheng, Liu Xinxing. 2014a. Discussion on metallogenic specialization of the magmatic rocks and related issues in the Nanling region[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(2): 230–238 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Xu Zhigang, Sheng Jifu, Zhu Mingyu, Xu Jie, Yuan Zhongxin, Bai Ge, Jue Wenjun, Li Huaqin, Chen Zhenghui, Wang

- Chenghui, Huang Fan, Zhang Changqin, Wang Yonglei, Ying Lijuan, Li Houmin, Gao Lan, Sun Tao, Fu Yong, Li Jiankang, Wu Guang, Tang Juexing, Feng Chengyou, Zhao Zheng, Zhang Daquan. 2014b. Progress on the study of regularity of major mineral resources and regional metallogenic regularity in China: A review[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2176–2191 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Li Jiankang, Li Jianguo. 2018. Theory and Practice of Deep Detection in Nanling Metallogenic Belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–47 (in Chinese).
- Wang Liankui, Huang Zhilong. 2000. Liquid Segregation and Experiment of Li–F Granite[M]. Beijing: Science Press, 1–290 (in Chinese).
- Wang Xueqiu, Liu Hanliang, Wang Wei, Zhou Jian, Zhang Bimin, Xu Shanfa. 2020. Geochemical abundance and spatial distribution of lithium in China: Implications for potential prospects[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(6): 797–806 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang, Wang Jiamin, Yang Lei. 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research[J]. *China Science: Earth Science*, 47(9): 745–765 (in Chinese with English abstract).
- Wu Guangying, Ma Tieqiu, Feng Yanfang, Yan Quanren, Liu Fuguo, Bo Daoyuan. 2008. Geological and geochemical characteristics and genesis of the Caledonian Wanyangshan granite in the Nanling Mountain[J]. *South China Geology in China*, 35(4): 608–617.
- Wu Yongle, Mei Yongwen, Liu Pengcheng, Cai Changliang, Lu Tongheng. 1987. Geology of Xihuashan Tungsten Deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–317 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Huiliang, Chen Lezhu, Bao Xiaoming, Fan Feipeng, Zhou Yan, Wu Hanyu, Yao Zhenghong, Wu Ling, Teng Long. 2012. Discovery and significance of Liangyuan Nb–Ta–Rb–W polymetallic deposit in Shixing, Guangdong[J]. *Resource Investigation and Environment*, 33(4): 229–237 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Huiliang, Chen Lezhu, Bao Xiaoming, Fan Feipeng, Zhou Yan, Wu Ling, Wu Hanyu. 2013. The prospecting for W–Sn polymetallic ore deposits in Shixing County, Guangdong[J]. *Geological Journal of China Universities*, 19(2): 213–219 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Huiliang, Chen Lezhu, Fan Feipeng, Li Haili, Bao Xiaoming, Zhou Yan, Yao Zhenghong, Cai Yitao. 2017. Characteristics of highly differentiated granite and metallization of tungsten–tin, rare and rare earth metal in the eastern Nanling region, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(S1): 100–101.
- Xiao Huiliang, Li Haili, Chen Lezhu, Xiao Fan, Zhou Yan, Xi Wanwan, Fan Feipeng. 2020. Discovery and characteristics of Niujiaolong tungsten polymetallic deposit in Ganxian district, Jiangxi Province[J]. *East China Geology*, 41(4): 305–314 (in Chinese with English abstract).
- Yang Minggui. 1998. Metallogenic Regularity and Prediction of Luoxiao–Wuyi Uplift and Chenzhou Shangrao Depression[M]. Beijing: Science Press, 1–115 (in Chinese).
- Yao Chunyan, Wang Tiangan, Ni Pei, Yao Zhongyou, Guo Weimin, Zhu Yiping, Wang Wei. 2021. Metallogenic types, characteristics and research progress of Nb–Ta deposits[J]. *Geology in China*, 48(6): 1748–1758 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Jianqi, Zhu Shangqing, Zhai Yusheng. 1985. Mineralogy[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–352 (in Chinese).
- Zhang B, Qi F Y, Gao X Z, Li X L, Shang Y T, Kong H Y, Jia L Q, Meng J, Guo H, Fang F K, Liu Y B, Jiang X, Chai H, Liu Z, Ye X T, Wang G D. 2022. Geological characteristics, metallogenic regularity, and research progress of lithium deposits in China[J]. *China Geology*, 5: 734–767.
- Zhang Zhengen. 1983. Granite—A type of granite related to tin deposits[J]. *Geological Geochemistry*, 4: 58–59 (in Chinese).
- Zhu Jinchu, Rao Bin, Xiong Xiaolin, Li Fuchun, Zhang Peihua. 2002. Comparison and genetic interpretation of Li–F rich, rare–metal bearing granitic rocks[J]. *Geochimica*, 31(2): 141–152 (in Chinese with English abstract).
- Zou Tianren, Xu Jianguo. 1975. On the origin and classification of granitic Pegmatite[J]. *Geochimica*, (3): 161–174(in Chinese).

附中文参考文献

- 陈骏, 陆建军, 陈卫峰, 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[J]. *高校地质学报*, 14(4): 459–473.
- 陈西京. 1976. 深处岩浆分异与某地花岗岩伟晶岩的形成[J]. *地球化学*, 3(5): 214–229.
- 陈毓川, 裴荣富, 张宏良, 林新多, 白鸽. 1989. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色及稀有金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 1–508.
- 陈毓川, 王登红, 徐志刚, 黄凡. 2014. 华南地区成矿和中生代岩浆成矿规律概要[J]. *大地构造与成矿学*, 38(2): 219–229.
- 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.
- 方贵聪, 陈郑辉, 陈毓川, 赵正, 侯可军, 曾载淋, 罗泽. 2017. 赣南大埠复式花岗岩体两期成岩年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 36(6): 1415–1424.
- 郭爱民, 陈必河, 陈剑锋, 周超, 司程山, 郑正福. 2017. 南岭诸广山北体复式花岗岩锆石 SHRIMP U–Pb 定年及多期岩浆活动[J]. *中国地质*, 44(4): 781–792.
- 华仁民, 毛景文. 1999. 试论中国东部中生代成矿大爆发[J]. *矿床地质*, 18(4): 300–308.
- 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[J]. *矿床地质*, 24(2): 99–107.
- 华仁民, 张文兰, 陈培荣, 翟伟, 李光来. 2013. 初论华南加里东花岗岩与大規模成矿作用的关系[J]. *高校地质学报*, 19(1): 1–11.

- 李建康, 李鹏, 王登红. 2019. 中国铌钽矿成矿规律[J]. 科学通报, 64: 1545-1566.
- 李建康, 邹天人, 王登红, 李兴杰. 2017. 中国铍矿成矿规律[J]. 矿床地质, 36 (4): 951-978.
- 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[J]. 岩石学报, 29(12): 4311-4322.
- 刘成林, 余小灿, 袁学银, 李瑞琴, 姚佛军, 沈立建, 李强, 赵元艺. 2021. 世界盐湖卤水型锂矿特征、分布规律与成矿动力模型[J]. 地质学报, 95(7): 2009-2029.
- 刘静, 张展适, 吴奕, 孟雷, 邵飞, 陈锐. 2015. 赣南大埠岩体年龄测定及其地质意义[J]. 世界核地质科学, 32(2): 101-106.
- 毛景文. 1997. 超大型钨多金属矿床成矿特殊性——以湖南柿竹园矿床为例[J]. 地质科学, 32(3): 351-363.
- 毛景文, 华仁民, 李晓波. 1999. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区预测[J]. 矿床地质, 18(4): 291-299.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 23(10): 2329-2338.
- 莫柱孙, 叶伯丹, 潘维祖, 江绍年, 庄锦良, 高秉璋, 刘金全, 刘文章. 1980. 南岭花岗岩地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1-363.
- 秦拯纬, 付建明, 邢光福, 程顺波, 卢友月, 祝颖雪. 2022. 南岭成矿带中一晚侏罗世成钨、成锡、成铅锌(铜)花岗岩的差异性研究[J]. 中国地质, 49(2): 518-539.
- 任纪舜, 杨巍然. 1998. 中国东部岩石圈结构与构造岩浆演化[M]. 北京: 原子能出版社, 1-12.
- 王登红, 陈毓川, 陈郑辉, 刘善宝, 许建祥, 张家菁, 曾载淋, 陈富文, 李华芹, 郭春丽. 2007. 南岭地区矿产资源形势分析和找矿方向研究[J]. 地质学报, 81(7): 882-890.
- 王登红, 陈振宇, 王凡, 王成辉, 赵芝, 陈郑辉, 赵正, 刘新星. 2014a. 南岭岩体成矿专属性及相关问题探讨[J]. 大地构造与成矿学, 38(2): 230-238.
- 王登红, 徐志刚, 盛继福, 朱明玉, 徐珏, 袁忠信, 白鸽, 屈文俊, 李华芹, 陈郑辉, 王成辉, 黄凡, 张长青, 王永磊, 应立娟, 李厚民, 高兰, 孙涛, 付勇, 李建康, 武广, 唐菊兴, 丰成友, 赵正, 张大权. 2014b. 全国重要矿产和区域成矿规律研究进展综述[J]. 地质学报, 88 (12): 2176-2191.
- 王登红, 李建康, 李建国. 2018. 南岭成矿带深部探测的理论与实践[M]. 北京: 地质出版社, 1-471.
- 王联魁, 黄智龙. 2000. Li-F花岗岩液态分离与实验[M]. 北京: 科学出版社, 1-290.
- 王学求, 刘汉粮, 王玮, 周建, 张必敏, 徐善法. 2020. 中国锂矿地球化学背景与空间分布: 远景区预测[J]. 地球学报, 41(6): 797-806.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 王佳敏, 杨雷. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. 中国科学: 地球科学, 47(9): 745-765.
- 吴永乐, 梅勇文, 刘鹏程, 蔡常良, 卢同衍. 1987. 西华山钨矿地质[M]. 北京: 地质出版社, 1-317.
- 伍光英, 马铁球, 冯艳芳, 闫全人, 刘富国, 柏道远. 2008. 南岭万洋山加里东期花岗岩地质地球化特征及成因[J]. 中国地质, 35(4): 608-617.
- 肖惠良, 陈乐柱, 鲍晓明, 范飞鹏, 周延, 吴涵宇, 姚正红, 武玲, 滕龙. 2012. 广东始兴良源钨钽铀钨多金属矿床的发现及其意义[J]. 资源调查与环境, 33(4): 229-237.
- 肖惠良, 陈乐柱, 鲍晓明, 范飞鹏, 周延, 姚正红, 武玲, 吴涵宇. 2013. 广东始兴地区钨锡多金属矿找矿实践与探索[J]. 高校地质学报, 19(2): 213-219.
- 肖惠良, 陈乐柱, 范飞鹏, 李海立, 鲍晓明, 周延, 姚正红, 蔡逸涛. 2017. 南岭东段地区钨锡、稀有、稀土金属成矿与高分异花岗岩特征[J]. 地质学报, 91(S1): 100-101.
- 肖惠良, 李海立, 陈乐柱, 肖凡, 周延, 隰弯弯, 范飞鹏. 2020. 江西赣县区牛角龙钨多金属矿床的发现及其特征[J]. 华东地质, 41(4): 305-314.
- 杨明桂. 1998. 罗霄—武夷隆起及郴州—上饶拗陷成矿规律及预测[M]. 北京: 地质出版社, 1-115.
- 姚春彦, 王天刚, 倪培, 姚仲友, 郭维民, 朱意萍, 王威. 2021. 钨钽矿床类型、特征与研究进展[J]. 中国地质, 48(6): 1748-1758.
- 袁见齐, 朱上庆, 翟裕生. 1985. 矿床学[M]. 北京: 地质出版社, 1-352.
- 章振根. 1983. 花岗岩——一种与锡矿有关的花岗岩[J]. 地质地球化学, 4: 58-59.
- 朱金初, 饶冰, 熊小林, 李福春, 张佩华. 2002. 富锂氟含稀有矿化花岗岩质岩石的对比和成因思考[J]. 地球化学, 31(2): 141-152.
- 中国科学院地球化学研究所. 1979. 华南花岗岩类的地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 215-220.
- 邹天人, 徐建国. 1975. 论花岗伟晶岩的成因与类型划分[J]. 地球化学, (3): 161-174.