

doi: 10.12097/gbc.2022.10.026

江西宁都白云母伟晶花岗岩型高纯石英用硅质原料矿床特征与资源潜力

唐春花¹, 张生辉^{2*}, 袁晶^{1,3}, 陈艳¹, 钱正江¹, 刘小龙¹, 孙超¹, 周渝^{1,4}

TANG Chunhua¹, ZHANG Shenghui^{2*}, YUAN Jing^{1,3}, CHEN Yan¹, QIAN Zhengjiang¹,
LIU Xiaolong¹, SUN Chao¹, ZHOU Yu^{1,4}

1. 江西省地质调查勘查院基础地质调查所, 江西 南昌 330030;

2. 中国地质调查局, 北京 100037;

3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

4. 东华理工大学地球科学学院, 江西 南昌 330013

1. Basic Geological Survey Institute of Jiangxi Geological Survey and Exploration Institute, Nanchang 330030, Jiangxi, China;

2. China Geological Survey, Beijing 100037, China;

3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

4. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China

摘要: 高纯石英以优异的物理化学性能成为战略性新兴产业的关键基础原料, 中国是高纯石英消费大国, 高端产品全部依赖进口。在高端高纯石英领域, 中国面临着优质高纯石英用硅质原料匮乏和高端产品提纯技术短板, 优质资源是提纯加工高端高纯石英的关键基础, 中国迫切需要突破优质资源瓶颈。通过与美国 Spruce Pine 白岗岩高纯石英用硅质原料矿床对比研究, 在武夷山隆起西部的江西宁都地区发现了白云母伟晶花岗岩型高纯石英用硅质原料, 认为西武夷山地区是花岗岩型高纯石英用硅质原料找矿有利地区。本次在成矿地质背景和矿床地质特征基础上, 开展矿石矿物特征、石英内部包裹体特征、气液包裹体成分、岩石地球化学、石英杂质元素、主要晶格杂质等研究, 探讨矿床成因, 评价资源潜力。宁都白云母伟晶花岗岩为亚碱性过铝质花岗岩, 富含钾长石, K 含量大于 Na, 具有较高的大离子亲石元素, 较低的高场强元素和稀土元素含量, Eu 既有正异常也有负异常。石英包裹体以气液为主, 气液包裹体面积占比 1.69%, 含少量白云母等矿物包裹体, 主要杂质元素 Mg、Fe、Li 与 Spruce Pine 白岗岩石英相近, 杂质元素总量低, 平均 618.03×10^{-6} 。石英主要晶格杂质 Al、Li、Ti 元素总量低, 为 89.82×10^{-6} , 石英纯度达到 SiO₂ 99.99% 以上, 是优质高纯石英矿物原料, 预测资源规模为大型。宁都白云母伟晶花岗岩赋存于会同岩体中深根部带, 为加里东期“S”型花岗岩, 由伴随会同岩体同期演化的富含长英质的浅色熔体演化成岩。研究成果对西武夷地区寻找同类型矿床具有典型矿床对比意义, 调查评价方法对中国同类型高纯石英用硅质原料找矿具有指导意义。

关键词: 江西; 白云母伟晶花岗岩; 高纯石英用硅质原料; 矿床特征; 资源潜力; 矿产勘查工程

中图分类号: P578.4⁺94; P588.12⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)05-0667-13

Tang C H, Zhang S H, Yuan J, Chen Y, Qian Z J, Liu X L, Sun C, Zhou Y. Deposit characteristics and potential resources of silicon material for high-purity quartz of muscovite-pegmatite-granite type in Ningdu, Jiangxi Province. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(5): 667-679

收稿日期: 2022-10-26; 修订日期: 2022-12-28

资助项目: 中国地质调查局项目《江西宁都、万载地区钴矿等关键矿产地质调查与找矿预测》(编号: DD20190159-2020-5)、《华东地区脉石英晶质石墨等重要非金属矿综合利用评价》(编号: DD20190186)、江西省重点研发计划项目《江西高纯石英矿物原料优选提纯关键技术与应用研究》(编号: 20212BBG71003)、江西省地质勘查基金项目《江西省宁都县王西村高纯石英原料矿普查》(编号: 20210016)

作者简介: 唐春花(1965-), 女, 教授级高级工程师, 从事区域地质矿产勘查与研究。E-mail: 553827851@qq.com

* 通信作者: 张生辉(1962-), 男, 正高级工程师, 从事矿产资源调查评价管理与研究。E-mail: zhang_shhui@163.com

Abstract: High-purity quartz, exhibiting exceptional physical and chemical properties, has emerged as a critical raw material for strategic industries. China, being a major consumer of high-purity quartz, currently relies on imports for all its high-end products in this domain. The primary challenges faced by China in the realm of high-end high-purity quartz lie in the scarcity of resources with superior quality silica as raw materials and the dearth of advanced processing technologies. High-quality and high-purity silica are crucial prerequisites for processing high-end, high-purity quartz. Therefore, China urgently needs to break through the bottleneck of high-quality resources. By conducting a comparative analysis with alaskite-type high-purity quartz material from the Spruce Pine region in the USA, we have discovered siliceous materials suitable for producing high-purity quartz in the Ningdu County of Jiangxi Province, located west of the Wuyi Mountains. Consequently, it can be inferred that prospecting in this region offers favorable conditions for obtaining granitic siliceous materials required for manufacturing high-purity quartz. Based on the study of metallogenic geological background and deposit geology, mineral characteristics of ores, quartz inclusions, gas-liquid inclusions composition in quartz, rock geochemistry, impurity elements in quartz and major lattice impurity elements were investigated to discuss the ore genesis and evaluate their resource potential. The Ningdu muscovite granitic pegmatite is classified as subalkaline peraluminous granite with a high abundance of K-feldspar. The K content exceeds that of Na, exhibiting enrichment in large ion lithophile elements while displaying low concentrations of high field strength elements and rare earth elements. Additionally, Eu anomalies are observed both positively and negatively. Gas-liquid inclusions are the predominant type of inclusions found in quartz, constituting approximately 1.69% of the total area, with a small number of mineral inclusions such as muscovite present. The impurity elements Mg, Fe, and Li exhibit similarities to Spruce Pine quartz in alaskite, while the overall content of impurity elements is relatively low at an average value of 618.03×10^{-6} . Within the quartz lattice structure, Al, Li, and Ti are identified as the main impurity elements with a very low total content (89.82×10^{-6}), whereas SiO_2 accounts for over 99.99% of quartz composition. This high-purity silicon material possesses excellent quality and exhibits significant potential as indicated by its abundant predicted resource quantity. Ningdu muscovite granitic pegmatite is situated within the middle-deep root zone of Huitong pluton and represents an S-type granite within the Caledonian orogenic belt that evolved from light-colored granitic magma enriched with feldspar and quartz during the same period as pluton's evolution process. These research findings hold great significance for comparative studies on similar ore deposits within western Wuyi region, and provide valuable guidance for prospecting activities targeting high-purity quartz silicon materials across China.

Key words: Jiangxi; muscovite pegmatite granite; silicon material for high-purity quartz; deposit characteristics; potential resources; mineral exploration engineering

高纯石英是高端技术领域的关键基础矿物原材料, 广泛应用在大规模及超大规模集成电路、光纤、太阳能电池、激光、航天、军事等行业中, 是信息、新能源等高科技技术产业的基石, 是面向未来的战略性资源。高品质矿物原料和针对性提纯技术是中国高纯石英产业可持续发展的两大瓶颈(张佩聪等, 2012; 李金超等, 2023), 而矿物原料的天然属性对提纯技术具有制约作用, 因此, 资源是关键。高纯石英用硅质原料是全球稀缺矿产资源, 目前, 全球规模性开发利用的矿床只有美国 Spruce Pine 白岗岩矿床(张晔等, 2010; 张佩聪等, 2012), 其产品垄断着国际高纯石英高端市场。中国对高纯石英需求旺盛, 为 2019 年全球第一大高纯石英进口国, 占全球进口总量的 70.35%, 随着中美贸易摩擦加剧, 2020 年以来中国进口量急剧下滑。在中国有极少数脉石英能满足高纯石英高端产品的要求(金达表等, 2004; 汪灵等, 2011; 汪灵等, 2014), 但由于脉石英矿床规模小、

石英品质变化大, 造成高纯石英砂产品质量不稳定, 无法保障长期稳定供应。因此高纯石英用硅质原料找矿突破是保障中国高纯石英产业可持续发展的关键(金达表等, 2004; 张晔等, 2010; 汪灵等, 2011; 张佩聪等, 2012; 汪灵等, 2014)。

通过与 Spruce Pine 白岗岩高纯石英用硅质原料矿床对比研究(Broad, 1954; Brobs, 1962), 在江西宁都地区调查发现了白云母伟晶花岗岩型高纯石英用硅质原料矿床, 石英 SiO_2 纯度可达 99.991% 以上, 预测资源规模为大型。本文以成矿地质背景和矿床地质特征为基础, 开展矿石矿物特征、石英内部包裹体特征、气液包裹体成分、岩石地球化学、石英杂质元素、主要晶格杂质等研究, 探讨白云母伟晶花岗岩成因, 以及区域变质作用对高纯石英成矿的影响, 评价了该矿床资源潜力, 对西武夷地区寻找同类型矿床具有典型矿床对比意义, 是花岗岩型高纯石英用硅质原料矿产调查评价方法的有益探索。

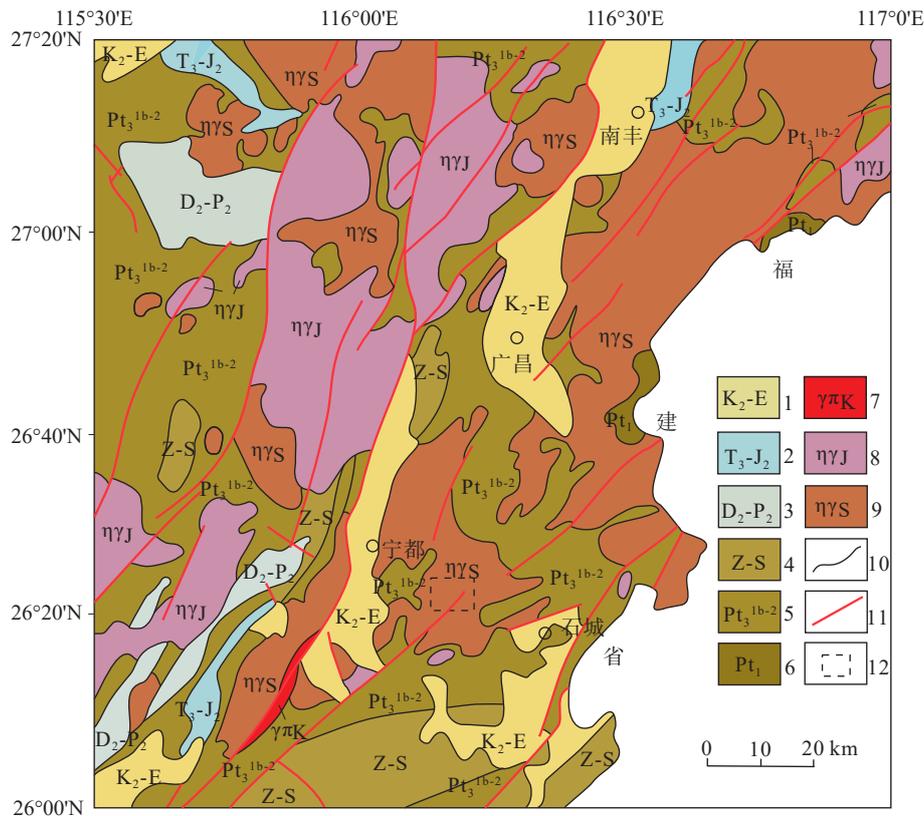


图 1 研究区地质略图

Fig. 1 Schematic geological map of the study area

1—上白垩统-古近系; 2—上三叠统-中侏罗统; 3—中泥盆统-中二叠统; 4—震旦系-志留系浅变质岩; 5—青白口系上部中浅变质岩; 6—古元古界深成变质岩; 7—白垩纪花岗岩斑岩; 8—侏罗纪二长花岗岩; 9—志留纪二长花岗岩; 10—地质界线; 11—断层; 12—研究区

1 成矿地质背景

江西宁都地区地处华夏板块东南造山带武夷山隆起西坡, 武夷隆起为加里东造山带中深部带, 隆起带内新元古代地层与花岗岩广泛分布, 并有古元古代一新元古代早期结晶基底出露(江西省地质矿产勘查开发局, 2017)。研究区以广泛分布青白口系上部中浅变质岩、震旦系—志留系浅变质岩, 志留纪、侏罗纪二长花岗岩, 北北东向、北东向断裂构造发育为特征, 中泥盆世—中二叠世、晚三叠世—中侏罗世沉积盖层零星分布, 晚白垩世—古近纪陆相断陷盆地受北北东向、北东向主干断裂控制, 呈北北东向、北东向展布(图 1)。

古元古界深成变质岩以黑云斜长变粒岩、黑云母变粒岩为主, 夹片岩、石英岩、斜长角闪岩, 青白口系上部中浅变质岩以片麻岩、片岩为主, 夹大理岩、磁铁石英岩、硅质岩等, 震旦系—志留系岩性为硅质

岩、砂岩、板岩、千枚岩等浅变质岩。古元古界—志留系构成了研究区的基底, 包括下部结晶基底和上部北东向紧密线型褶皱。

侵入岩以志留纪、侏罗纪二长花岗岩为特征, 志留纪侵入岩分布较广, 侏罗纪侵入岩主要分布于鹰潭—安远大断裂西侧。

北东—北北东向断裂发育, 规模较大, 主要有北北东向的鹰潭—安远深断裂、永平—寻乌大断裂, 北东向的洪门—湖石、驿前—黄岗山等大断裂, 多以左行侧列式成组出现, 控制了中生代盆地。北西向断裂断续出现, 一般规模较小。

2 矿床地质特征

矿区地质构造相对简单(图 2), 主要出露晚志留世中—粗粒斑状黑云母二长花岗岩, 属会同岩体。白云母伟晶花岗岩赋存于斑状黑云母二长花岗岩中, 发育北北西向、北北东向小型断裂, 晚期花岗斑

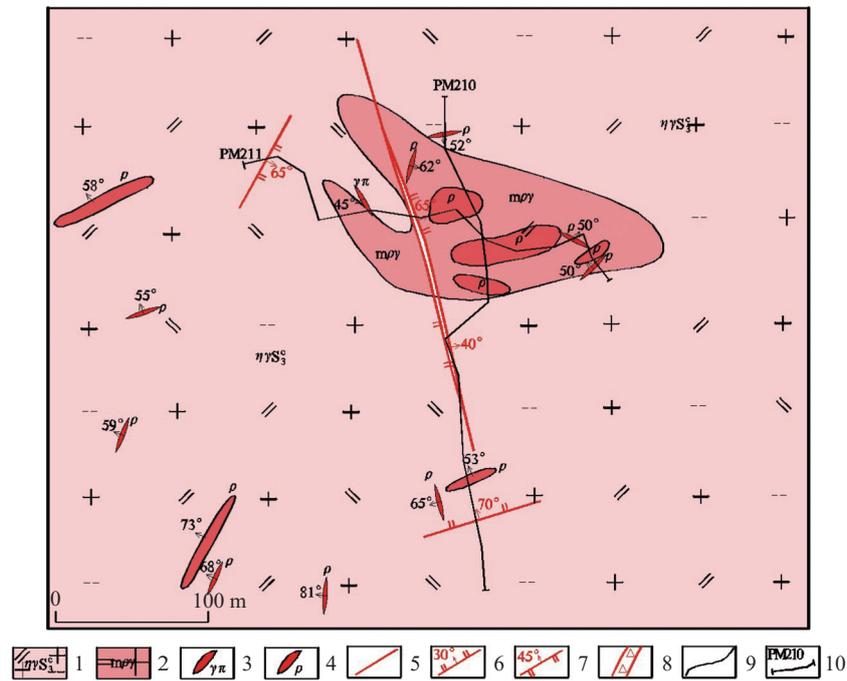


图2 矿区地质简图

Fig. 2 Schematic geological map of the mining area

- 1—晚志留世中-粗粒斑状黑云母二长花岗岩; 2—白云母伟晶花岗岩; 3—花岗斑岩脉; 4—伟晶岩脉; 5—实测性质不明断层;
6—实测正断层; 7—实测逆断层; 8—断层破碎带; 9—实测整合岩层界线; 10—实测剖面及编号

岩沿断裂充填成脉。

晚志留纪中-粗粒斑状黑云母二长花岗岩, 岩石具斑状结构, 块状构造, 主要矿物含量: 石英 25%~26%; 斜长石 33%~35%; 钾长石 32%; 黑云母 5%~8%; 少量白云母。斑晶主要为钾长石, 肉红色, 长柱状, 粒径一般 $1\text{ cm} \times 5\text{ cm} \sim 2\text{ cm} \times 10\text{ cm}$, 多堆晶状, 定向排布(图 3-a), 基质主要由中粗粒钾长石、斜长石、石英、黑云母等组成。

高纯石英矿体为白云母伟晶花岗岩体(图 3-b), 岩体呈不规则岩滴状, 总体北西西走向, 地表出露长

390 m, 宽 170 m, 面积 0.035 km^2 , 由 PM210、PM211 两条地质剖面控制(图 4、图 5), 东部边界未完全控制。岩石强烈风化, 风化层厚度达十余米, 白云母伟晶花岗岩内部不均匀, 与围岩斑状黑云母二长花岗岩的接触关系不明确, 似渐变过渡关系(图 6), 由外向内划分为斑状黑云母二长花岗岩、红化斑状黑云母二长花岗岩、白云母伟晶花岗岩、伟晶细脉群 4 个带。伟晶岩呈规模不等的脉状密集产出, 脉宽小者 10~20 cm, 规模大者 5~6 m, 普遍具有分带性。

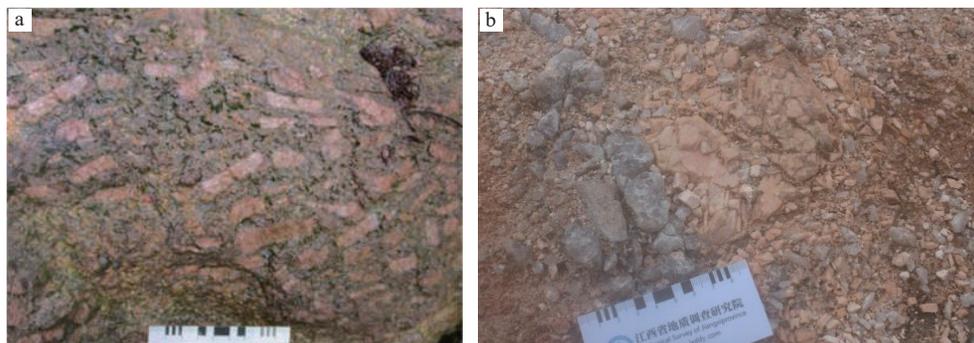


图3 钾长石堆晶(a)和白云母伟晶花岗岩(b)野外照片

Fig. 3 Heaped crystalline potassium feldspar (a) and muscovite pegmatite granite (b)

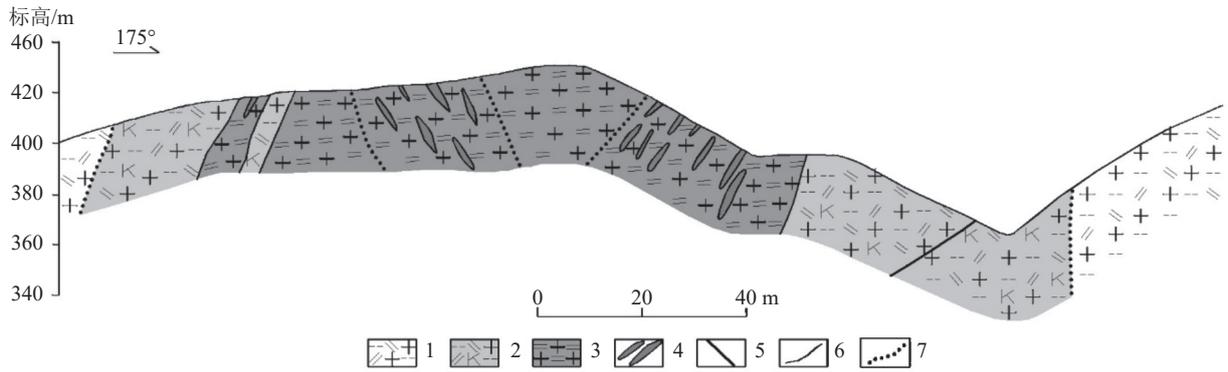


图 4 PM210 实测地质剖面图(部分)

Fig. 4 PM210 measured geological section (part)

1—斑状黑云母二长花岗岩; 2—红化斑状黑云母二长花岗岩; 3—白云母伟晶花岗岩; 4—伟晶岩脉;
5—断层; 6—地质界线; 7—岩性过渡线

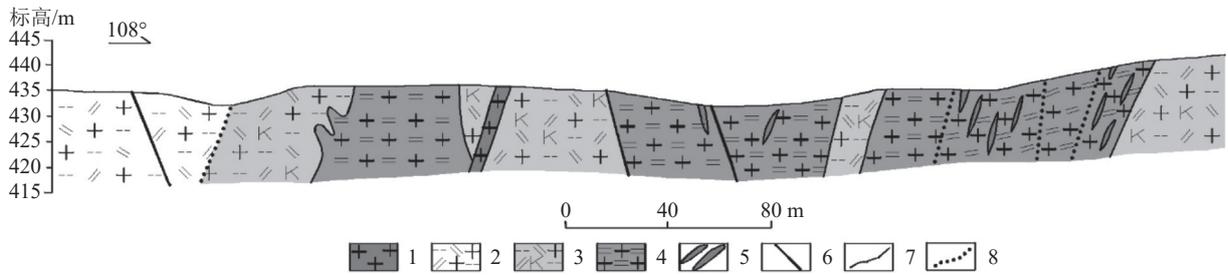


图 5 PM211 实测地质剖面图(部分)

Fig. 5 PM211 measured geological section (part)

1—花岗斑岩; 2—斑状黑云母二长花岗岩; 3—红化斑状黑云母二长花岗岩; 4—白云母伟晶花岗岩;
5—伟晶岩脉; 6—断层; 7—地质界线; 8—岩性过渡线

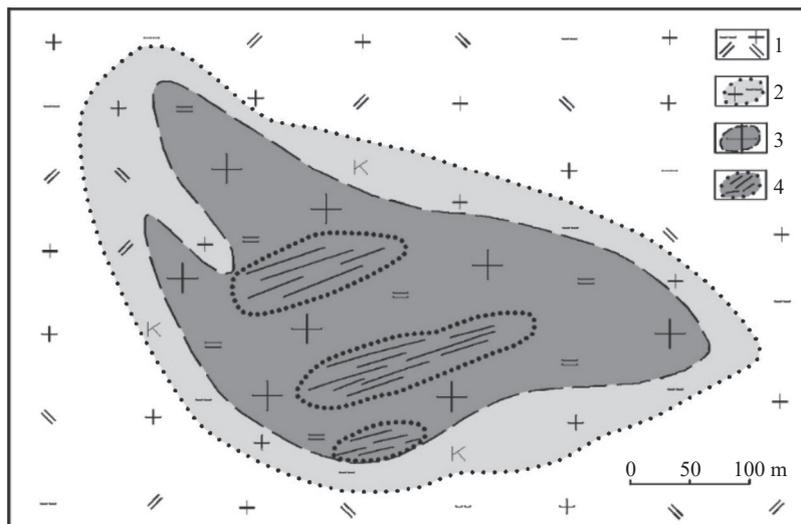


图 6 白云母伟晶花岗岩高纯石英矿体特征示意图

Fig. 6 Schematic diagram of high-purity quartz ore body characteristics of muscovite pegmatite granite

1—斑状黑云母二长花岗岩; 2—红化斑状黑云母二长花岗岩; 3—白云母伟晶花岗岩; 4—伟晶细脉群

3 矿石特征

3.1 矿石矿物特征

矿石为白云母伟晶花岗岩(图3-b),根据岩石矿物成分和粒度结构变化,可进一步细化为细—中细粒白云母花岗岩、中—粗粒伟晶花岗岩和伟晶细脉群。岩石风化强烈,风化色呈浅肉红色、灰白色、褐黄色,伟晶花岗、伟晶结构,块状构造。主要矿物为石英、钾长石、斜长石、白云母,不同粒级结构带矿物含量变化较大。细—中细粒白云母花岗岩中矿物粒度1~5 mm,多数1~2 mm,石英30%,钾长石45%~50%,斜长石10%~15%,白云母10%,黑云母1%,少量暗色矿物;中—粗粒伟晶花岗岩中矿物粒度5~50 mm,矿物不均匀分布,石英45%~55%,钾长石10%~40%,斜长石5%,白云母20%~25%,少量暗色矿物;伟晶细脉中矿物粒度变化极大,3~30 cm,主要为3~5 cm,石英50%,钾长石30%,白云母20%,少量石榴子石等副矿物。石英呈烟灰色,半透明,玻璃光泽,镜下呈他形粒状,具波状消光,少量裂纹;钾长石呈肉红色,为微斜长石,他形粒状,具格子双晶,有不均匀微弱尘状蚀变;斜长石呈浅灰色—白色,半自形—他形板状,为更长石,具细密的卡钠复合双晶,与钾长石接触处有时可见交代蠕英结构;白云母呈浅棕色、白色集合片状,镜下呈他形片状,有的略有弯曲及波状消光;黑云母呈他形片状,一般小于1 mm,多被绿泥石交代,析出铁钛氧化物,局部被白云母交代。少量电气石、石榴子石、软锰矿、磷灰石、锆石等副矿物。

3.2 石英显微特征

通过光学显微镜对白云母伟晶花岗岩中的块状石英进行显微观察,石英呈他形粒状,部分颗粒大于10 mm,多数呈亚晶粒(图版I-a),并有压扁拉长及定向展布现象,条带状、斑块状波状消光明显,部分颗粒间的细小亚晶粒发生了重结晶,粒度0.02~0.1 mm。

石英颗粒中的包裹体以气液包裹体为主,偶见矿物包裹体和次生包裹体(图版I-b~d)。气液包裹体分布不均匀,主要呈带状分布(图版I-e),部分分散状分布(图版I-b, f),流体包裹体(FI)主要呈椭圆状或圆状(图版I-b),大小以2~10 μm 为主,少量大者可达15~20 μm 。偶见片状白云母包裹体

(图版I-c),粒径10 μm ×50 μm 。局部发育少量次生包裹体,沿裂隙呈线状分布(图版I-d)。

通过电子显微镜石英颗粒气液包裹体面积统计(图版I-f~h),气液包裹体面积占0.85%~2.98%,平均1.69%。

3.3 气液包裹体成分

采用激光拉曼测试石英内部气液包裹体的成分,测试工作在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室完成,激光拉曼图谱见图7。石英中气液包裹体成分主要有 COS 、 SO_4 、 SO_2 、 CO_2 、 CO 。 COS 主要存在于煤、石油和天然气中,火山爆发和深海热液喷流口均产生 COS 、 SO_4 、 SO_2 、 CO_2 、 CO 为 COS 衍生化学气体,反映成岩时为还原环境。

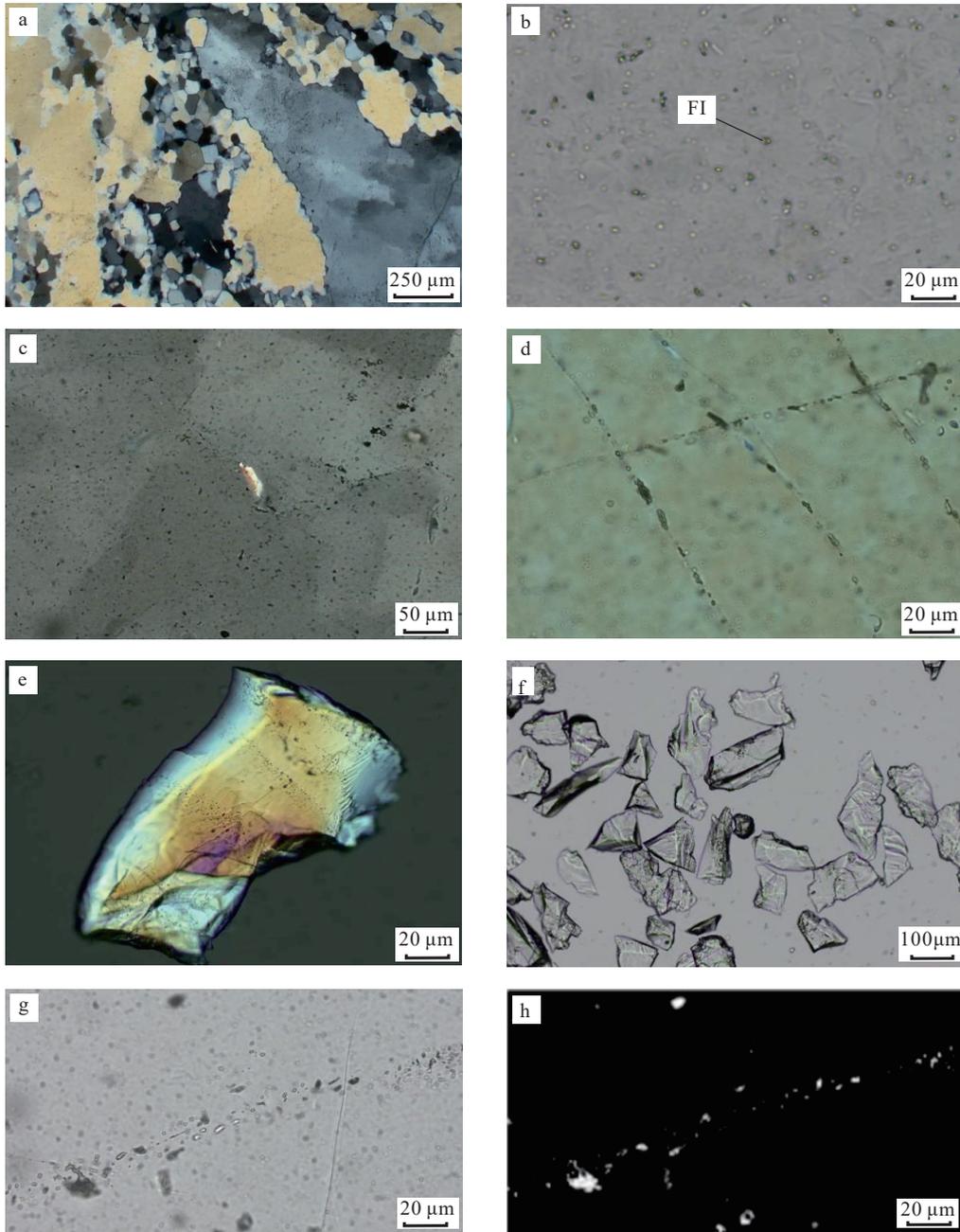
3.4 岩石主量元素特征

代表性白云母伟晶花岗岩样品ND-01、ND-02、ND-03的分析结果见表1。岩石富硅, SiO_2 含量为80.25%~74.10%;富碱,ALK为7.26%~4.79%,K含量大于Na,K/N值为1.66~22.83; Al_2O_3 为11.7%~15.4%;低钙镁,铁偏高, Fe_2O_3 为0.86%~0.56%,MgO为0.01%~0.056%,CaO为0.35%~0.032%;铝饱和指数(A/CNK)为1.60~2.54,为过铝质。因此,具有亚碱性和过铝质的主量元素化学特征,为亚碱性过铝质花岗岩。与Spruce Pine白岗岩相比,宁都白云母伟晶花岗岩钾含量大于钠,呈过铝质,而前者钠含量大于钾,呈弱过铝质,为亚碱性弱过铝质花岗岩(张晔等,2010)。

3.5 岩石微量和稀土元素特征

代表性样品ND-01、ND-02、ND-03岩石微量和稀土元素分析结果见表2。微量元素Ba、Sr、Nb变化较大,亲石元素相对富集, ΣLILE 为 259×10^{-6} ~ 1615×10^{-6} ,微量元素标准化模式ND-01、ND-03相近,ND-02变化较大(图8-a),与Spruce Pine白岗岩比较,ND-01与SP-02模式基本一致,仅Nd、Zr差别较大,ND-03与SP-01模式相似,Nb、Ta差别较大。稀土元素总量较低,为 24.61×10^{-6} ~ 49.19×10^{-6} ,轻稀土元素相对富集,LREE/HREE值为2.867~10.025, δEu 值为0.529~1.99,出现明显正、负异常和弱异常。与Spruce Pine白岗岩比较,ND-01与SP-02稀土元素球粒陨石标准化模式相似(图8-b),均为Eu正异常;ND-03与SP-01模式也相似,Eu为弱负异常和弱正异常;ND-02差别较大,Eu为负异常。

图版 I Plate I



a. 波状消光、亚晶粒及重结晶(+); b. 分散分布气液包裹体(+); c. 白云母包裹体(+); d. 次生包裹体(-);
e. 透明带与气液包裹体带(+); f. 透明石英砂(-); g. 带状气液包裹体(-); h. 气液包裹体分布

3.6 石英杂质元素特征

将 ND-01、ND-02 白云母伟晶花岗岩破碎至 -10~+50 目, 双目镜下人工挑选石英单矿物, 经酸洗表面处理后开展分析测试。测试单位为自然资源部南昌矿产资源检测中心, 分析项目为 SiO_2 、Al、Na、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Li、B、Ti、Cu、Cr、Ni, 分析采用 ICP-MS 方法, 分析结果见表 3。石英单矿物 SiO_2 含量分别为 99.88% 和 99.82%, 平均 99.85%,

13 种杂质元素含量合计分别为 618.71×10^{-6} 和 617.35×10^{-6} , 平均 618.03×10^{-6} 。与 Spruce Pine 白岗岩石英比较(Spruce Pine 白岗岩中石英单矿物测试时受脉石矿物污染(张晔等, 2010), Al、Na、K、Ca 明显偏高, 无对比意义), 宁都白云母伟晶花岗岩石英的 Mg、Fe、Li 含量基本相同, Ti、Cr、Ni 偏高(表 3)。从杂质元素含量初步判断, 宁都白云母伟晶花岗岩中的石英具有较高的高纯石英提纯潜力。

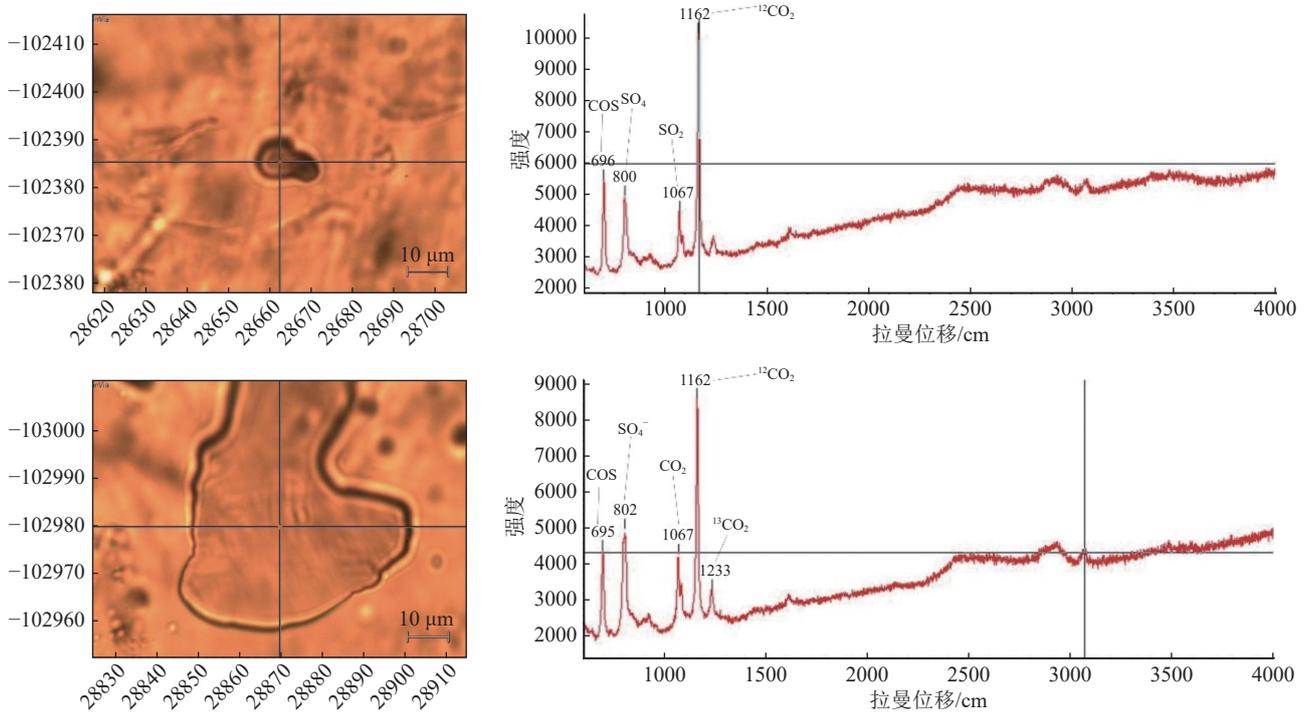


图7 石英气液包裹体激光拉曼图

Fig. 7 Laser Raman spectra of the quartz gas-liquid inclusion

表1 矿石化学成分

Table 1 Chemical compositions of the ores

| 样号 | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | FeO | TFeO | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | P ₂ O ₅ | TiO ₂ | MnO | 烧失量 | 总计 | |
|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-------|-------|------------------|-------------------|-------------------------------|------------------|-------|------|--------|--|
| ND-01 | 80.25 | 11.70 | 0.86 | / | / | 0.35 | 0.056 | 3.06 | 1.725 | 0.047 | 0.052 | 0.101 | 2.0 | 100.2 | |
| ND-02 | 74.10 | 15.29 | 0.79 | / | / | 0.032 | 0.051 | 5.16 | 0.226 | 0.018 | 0.078 | 0.046 | 3.92 | 99.711 | |
| ND-03 | 74.34 | 15.4 | 0.56 | / | / | 0.1 | 0.1 | 4.52 | 2.74 | 0.01 | 0.026 | 0.044 | 1.68 | 99.73 | |
| SP-01* | 75.50 | 15.60 | 0.27 | 0.10 | 0.34 | 1.54 | 0.21 | 1.29 | 6.62 | 0.06 | 0.02 | 0.02 | 0.5 | 100.73 | |
| SP-02* | 77.60 | 12.95 | 0.15 | 0.19 | 0.32 | 1.15 | 0.19 | 2.49 | 4.76 | 0.05 | 0.02 | 0.02 | 0.42 | 99.99 | |
| 样号 | ALK | K/N | A/NK | A/CNK | | | | | | | | | | | |
| ND-01 | 4.79 | 1.77 | 1.9 | 1.72 | | | | | | | | | | | |
| ND-02 | 5.39 | 22.83 | 2.57 | 2.54 | | | | | | | | | | | |
| ND-03 | 7.26 | 1.66 | 1.63 | 1.60 | | | | | | | | | | | |
| SP-01* | 7.91 | 0.19 | 1.27 | 1.03 | | | | | | | | | | | |
| SP-02* | 7.25 | 0.52 | 1.23 | 1.026 | | | | | | | | | | | |

注: ALK = Na₂O + K₂O(%); K/N = K₂O / Na₂O; A/NK = Al₂O₃ / (Na₂O + K₂O)(分子数比); A/CNK = Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O)(分子数比); SP-01*、SP-02*为Spruce Pine白岗岩,数据据张晔等,2010;“/”为未测

中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所对宁都白云母伟晶花岗岩石英开展了单矿物晶格杂质实验研究,主要晶格杂质元素含量为: Al 54.94×10^{-6} 、Li 1.03×10^{-6} 、Ti 13.71×10^{-6} ,合计 89.82×10^{-6} ,石英纯度达 SiO₂ 99.991%,具有良好的提纯性能。

4 预测资源量

对宁都白云母伟晶花岗岩石英资源量进行了初步估算,矿体预测面积 0.035 km²,预测侵蚀基准面以

上标高 210~450 m 石英资源量,矿石比重 2.65 g/cm³,石英平均含量为 41.3%,初步估算石英资源储量为 919.34×10^4 t,石英 SiO₂ 含量 99.8%,达到器皿玻璃用硅质原料一级品,达到玻璃用脉石英大型规模。

Spruce Pine 白岗岩 IOTA 矿山,开采时有 50%~75% 的原矿石被扔掉,只有 50%~25% 的原矿可满足 IOTA 系列高纯石英产品生产要求,宁都白云母伟晶花岗岩石英 SiO₂ 99.99% 以上高纯石英按占 25% 估算,预测资源量可达 229.84×10^4 t,具有极

表 2 矿石稀土和微量元素含量

Table 2 Rare earth elements and trace elements of ore

10⁻⁶

| 样号 | Rb | Ba | Sr | ∑LILE | Th | Nb | Ta | Zr | Hf | Y | ∑HFSE | La | Ce | Pr |
|--------|------|------|-----|--------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| ND-01 | 285 | 1140 | 190 | 1615 | 3.09 | 3.92 | 0.57 | 26.6 | 1.62 | 0.86 | 36.66 | 5.03 | 10.1 | 1.61 |
| ND-02 | 170 | 77 | 12 | 259 | 6.78 | 29.6 | 3.1 | 30.2 | 2.01 | 20.5 | 92.19 | 9.73 | 13.5 | 2.48 |
| ND-03 | 171 | 421 | 138 | 730 | 2.72 | 18.3 | 1.97 | 43.2 | 2.68 | 6.15 | 75.02 | 4.5 | 11.2 | 1.28 |
| SP-01* | 26.3 | 182 | 219 | 427.3 | 1.58 | 3.75 | 0.28 | 30 | 1.17 | 5.68 | 42.46 | 3 | 6 | 0.68 |
| SP-02* | 60.7 | 981 | 31 | 1072.7 | 0.92 | 2.86 | 0.31 | 3.1 | 0.2 | 2.8 | 10.19 | 1.66 | 5.77 | 0.33 |

| 样号 | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | ∑REE | LREE/HREE | δEu |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|--------|-----------|-------|
| ND-01 | 5.46 | 1.15 | 0.68 | 0.88 | 0.14 | 0.64 | 0.12 | 0.29 | 0.037 | 0.25 | 0.039 | 26.416 | 10.025 | 1.99 |
| ND-02 | 8.26 | 2.13 | 0.37 | 2.1 | 0.46 | 3.06 | 0.65 | 2.22 | 0.45 | 3.26 | 0.52 | 49.19 | 2.867 | 0.529 |
| ND-03 | 5.1 | 1.68 | 0.48 | 1.61 | 0.3 | 1.44 | 0.26 | 0.62 | 0.08 | 0.46 | 0.06 | 27.57 | 4.708 | 0.88 |
| SP-01* | 2.83 | 0.93 | 0.42 | 1.26 | 0.22 | 1.25 | 0.19 | 0.48 | 0.06 | 0.33 | 0.05 | 17.7 | 3.609 | 1.19 |
| SP-02* | 1.29 | 0.43 | 0.47 | 0.55 | 0.09 | 0.55 | 0.09 | 0.22 | 0.03 | 0.15 | 0.02 | 11.65 | 5.853 | 2.97 |

注: SP-01*、SP-02*为Spruce Pine白岗岩, 数据据张晔等, 2010

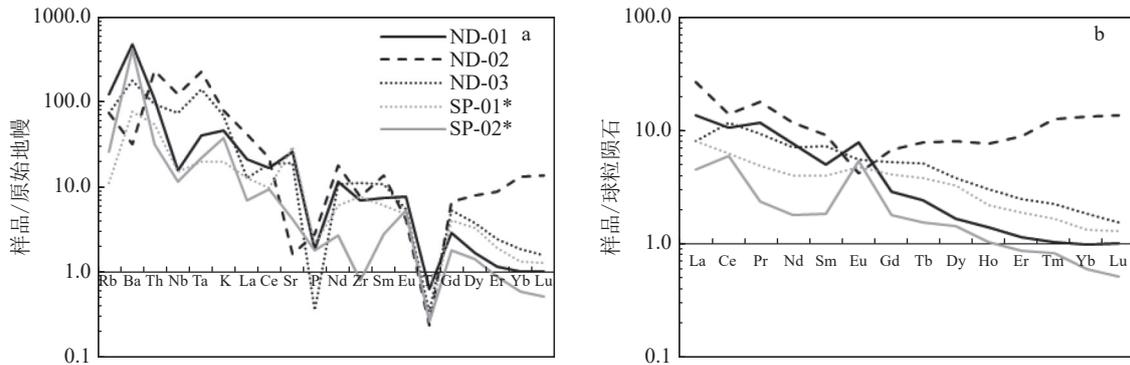


图 8 微量元素原始地幔标准化图解(a)和稀土元素球粒陨石标准化图解(b)

(标准化值据 Sun et al,1989; *数据据张晔等, 2010)

Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace elements plot(a) and chondrite-normalized REE plot(b)

表 3 石英 SiO₂ 及主要杂质元素含量

Table 3 Content of SiO₂ and impurity chemical compositions in quartz

| 样品 编号 | SiO ₂ /% | 杂质元素/10 ⁻⁶ | | | | | | | | | | | | | |
|----------|---------------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|----------|
| | | Al | Na | K | Ca | Mg | Fe | Mn | Li | B | Ti | Cu | Cr | Ni | 总计 |
| ND-01 | 99.88 | 375 | 60 | 57.6 | 36.1 | 27.3 | 29.5 | 1.75 | 11.7 | 1.41 | 14.5 | <1 | 1.85 | <1 | 618.71 |
| ND-02 | 99.82 | 307 | 125 | 54.7 | 50.2 | 28.4 | 29.7 | 2.89 | 1.38 | 1.02 | 12.9 | <1 | 1.90 | 1.26 | 617.35 |
| SP-01* | / | 11622 | 6669 | 347 | 1898 | 19.5 | 51 | / | 2.51 | / | 1.6 | <0.05 | 0.1 | <0.05 | 20615.83 |
| SP-02* | / | 7573 | 4839 | 182 | 1635 | 28 | 23.4 | / | 1.03 | / | 1.29 | <0.05 | 0.08 | <0.05 | 14301.9 |

注: SP-01*、SP-02*为Spruce Pine白岗岩, 数据据张晔等, 2010; “/”为未测

大的开发利用价值。

5 讨论

5.1 矿床成因类型

通过与 Spruce Pine 典型矿床对比研究, 认为宁都地区具有与美国 Spruce Pine 白岗岩型高纯石英矿

床(Broad, 1954; Brobst, 1962; 张晔等, 2010; 张佩聪等, 2012)相似的成矿地质背景和矿床地质特征(表 4), 为 S 型花岗岩高度分异矿床。

Spruce Pine 白岗岩为产于阿巴拉契亚褶皱带的早古生代侵入岩。阿巴拉契亚大地构造演化活动主要集中在前寒武纪—泥盆纪, 为洋壳向陆壳俯冲消

表 4 Spruce Pine 与宁都典型矿床成矿地质条件对比

Table 4 Geological conditions of mineralization from the typical deposit in Spruce Pine and Ningdu

| 成矿地质条件 | Spruce Pine | 宁都 |
|--------|--|---|
| 矿床类型 | 白岗岩型高纯石英矿床(包含粗粒—巨粒—伟晶花岗岩) | 白云母伟晶花岗岩型高纯石英矿床 |
| 规模 | 特大型 | 预测为大型规模 |
| 成矿构造背景 | 阿巴拉契亚褶皱带 | 东南造山带武夷隆起带 |
| 成矿时代 | 早古生代, 晚奥陶世—早志留世 | 早古生代、晚志留世 |
| 成矿地质体 | 8个白岗岩体, 最大的长3.2 km, 宽1.2 km。伟晶岩赋存于白岗岩中, 数千条, 长1~610 m, 宽1~305 m | 区域地质调查发现数百条伟晶岩脉, 分布于岩浆岩体内外接触带, 以及多处白云母花岗岩 |
| 围岩 | 白岗岩侵入于新元古代变质围岩中, 也有伟晶岩侵入变质岩内 | 白云母伟晶花岗岩赋存于晚志留世斑状黑云母二长花岗岩内, 斑状黑云母二长花岗岩侵入于新元古代变质岩, 有较多伟晶岩侵入变质岩内 |
| 主要矿物 | 伟晶岩与白岗岩矿物成分一致, 石英25%、长石60%、白云母15%、黑云母少量 | 石英30%~50%、长石55%~65%、白云母7%~10%、黑云母1%。赋存在白云母伟晶花岗岩中的伟晶岩矿物成分与白云母伟晶花岗岩一致 |
| 矿石粒度 | 白岗岩平均粒度12.7 mm, 伟晶岩矿物粒径大于12.7 mm, 极少颗粒直径达4.57 mm | 白云母伟晶花岗岩粒径5~50 mm, 伟晶岩矿物粒径5 mm到30 cm以上, 伟晶花岗岩平均15 mm |
| 岩浆类型 | S型花岗岩, 亚碱性弱过铝质花岗岩 | S型花岗岩, 亚碱性过铝质花岗岩 |
| 石英产品品级 | SiO ₂ 99.998%、SiO ₂ 99.999%、SiO ₂ 99.9991%、SiO ₂ 99.9992%* | SiO ₂ 99.991% |

注: *数据据中国粉体技术网——美国尤尼明公司IOTA高纯石英技术指标介绍(杨军, 2004)

减的板块汇聚边缘, 大部分地质历史时期处于长期隆起及剥蚀状态, 形成了一系列元古宙、古生代核杂岩。

宁都白云母伟晶花岗岩分布于会同岩体中, 会同岩体为产于东南造山带武夷隆起带的早古生代侵入岩。武夷隆起带为加里东造山带的中深部带, 隆起带内新元古代地层与花岗岩广泛分布, 并有古元古代—新元古代早期结晶基底(下构造层)出露。会同岩体与 Spruce Pine 白岗岩均为早古生代上部地壳重熔型花岗岩(高维敬等, 1994; 张芳荣等, 2009; 崔圆圆等, 2013)。

Spruce Pine 白岗岩呈亚碱性, 以斜长石为特征, 相对富钠, 弱过铝质(张晔等, 2010)。宁都白云母伟晶花岗岩为亚碱性过铝质花岗岩, 与 Spruce Pine 白岗岩不同, 以钾长石为特征, 且 $K > Na$, 可能为岩浆物质来源不同所致。两者成岩物质均来自上部地壳硅铝层, 属 S 型花岗岩。从微量和稀土元素特征看, 两者均具有较高的大离子亲石元素, 较低的高场强元素和稀土元素特征, ND-01、ND-03 分别与 SP-02、SP-01 的微量和稀土元素标准化模式基本一致, Eu 出现正异常、弱负异常, 可以类比, 反映了成因上的相似性, 同时, 也存在 ND-02 稀土元素特征明显差异, Eu 负异常。说明两者既有成因上的相似性, 也

存在一定的差异。

5.2 资源潜力

西比科北美公司采用 Spruce Pine 白岗岩矿床原料, 通过技术处理、化学提纯等方法去除 Li、K、Na、Fe 等杂质, 生产出 IOTA 系列高纯石英产品, Al、Ti、Na、K、Ca、Mg、Fe、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Zr、Mo、B、Li、P、S 等杂质含量小于 20×10^{-6} , SiO₂ 含量大于 99.998% 的高纯石英, 并实现产业化。

Spruce Pine 白岗岩是由 8 个区域性岩体露头连成的巨大白岗岩岩体或岩体群, 其中最大的岩基长 3.2 km, 宽 1.2 km。伟晶岩岩脉和伟晶岩岩块散布于白岗岩岩基中, 也有分布于变质围岩中, 出露的伟晶岩有数千个, 长度从不足 1 m 至 610 m, 宽度从不足 1 m 至 305 m。伟晶岩多集中分布于该地区西部和北部的 40 km×16 km 范围内, 初步勘查高纯石英资源量大于 1000×10^4 t, 为高纯石英特大型矿床。

从石英杂质元素特征看, 宁都白云母伟晶花岗岩的 Mg、Fe、Li 含量与 Spruce Pine 白岗岩基本相同, Ti、Cr、Ni 相对偏高, 杂质元素总量低。石英矿物内部包裹体以气液包裹体为主, 含少量白云母等矿物包裹体。石英主要晶格杂质 Al、Li、Ti 元素含量低, 石英纯度达 SiO₂ 99.991%。有研究(Götze, 2012; 郭文达等, 2019; 马超等, 2019)表明, 石英单矿

物杂质元素主要由晶格杂质和包裹体引起, 由于 Al、Ti 与 Si 离子半径相近, 在自然界石英存在广泛的 Al^{3+} 、 Ti^{4+} 置换 Si^{4+} , Li^{+} 以补偿电荷占位, Al、Li、Ti 是石英主要的晶格杂质元素, 在不破坏晶格的情况下, 晶格杂质是不可能去除的, 包裹体主要为气体流体包裹体和微小的矿物包体, 可通过提纯工艺去除(汪灵等, 2013)。因此, 某种程度上说, Al、Li、Ti 元素的含量决定了石英的提纯性能, 宁都白云母伟晶花岗岩石英是优质高纯石英矿物原料。

宁都地区属于武夷隆起西坡, 1:20 万区域地质调查发现伟晶岩数百条, 本次面上调查白云母伟晶花岗岩、伟晶花岗岩、伟晶岩等 300 多处, 出露于加里东期侵入岩和前寒武系中浅变质岩中(邓晋福等, 1994; 曾勇等, 2000), 分布于北东向长 60~70 km, 北西向宽 30~40 km 范围内。对 7 处规模较大的矿体进行了资源量估算, 初步预测侵蚀基准面以上石英资源量逾 2600×10^4 t, 预测资源规模达大型以上, 是花岗岩型高纯石英矿床找矿的有利地区。

5.3 区域变质作用对高纯石英成矿的影响

Spruce Pine 白岗岩矿床分为高铝和低铝矿床(杨军, 2004), 高铝矿床生产 IOTA-STD (SiO_2 99.998%), 低铝矿床专门生产 IOTA-4、6、8 (SiO_2 99.999%、 SiO_2 99.9991%、 SiO_2 99.9992%), 低铝矿床在阿乐汉尼(alleghanian)绿片岩运动中, 导致了石英动力学重结晶, 石英颗粒的晶体塑性变形, 导致晶体空隙杂质沿新形成的颗粒界限集中, 与变形运动相随的液体, 有助于这些杂质的溶解和迁移, 使杂质从重新结晶的石英颗粒中移出, 这一低变质岩相作用对于排除石英晶格杂质元素和气液包裹体起到了关键作用。

宁都白云母伟晶花岗岩地处武夷隆起加里东造山带, 总体属于中深部变质相带, 变质程度极不均匀, 主要与加里东期热穹窿递进变质和断裂带动力热流变质作用的复合叠加有关(高维敬等, 1994; 张芳荣等, 2009; 崔圆圆等, 2013; 郭文达等, 2019), 属绿片岩-角闪岩相中浅变质。白云母伟晶花岗岩中石英重结晶、波状消光发育(图版 I-a), 多数重结晶共结角为 120° , 说明重结晶作用较充分, 有利于石英晶格杂质排除, 形成低杂质高纯度石英, 但同时, 石英的重结晶作用不均匀, 意味着只有部分石英经过了重结晶排杂过程, 导致石英杂质含量存在较大的差异, 推测同样存在高铝和低铝石英的情况。

Spruce Pine 白岗岩为早古生代岩浆侵入, 在期

后的岩浆演化地质过程中, 阿巴拉契亚褶皱带处于长期隆起剥蚀状态, 无论是构造活动还是金属成矿作用均十分微弱, 对于避免石英遭受后期地质作用影响而降低品质十分关键。同样, 武夷隆起西坡自加里东运动隆起后长期处于剥蚀状态, 燕山运动主要影响了鹰潭-安远大断裂西侧, 研究区内仅有小规模燕山期花岗斑岩出露, 后期构造运动与热液成矿作用均较弱。

5.4 白云母伟晶花岗岩成因

白岗岩主要成分为石英、碱性长石和斜长石, 少量云母, 不含其他暗色矿物, SiO_2 含量达到 75% 左右, 为花岗岩类变种, 是一种高度分异的岩浆岩冷凝后期产物(桑隆康等, 2001)。与 Spruce Pine 白岗岩不同, 宁都白云母伟晶花岗岩为浅色花岗岩, 分布于会同岩体内。

会同岩体于北北东向鹰潭-安远深大断裂与北东向驿前-黄冈山断裂交会处上侵, 向北东扩展延伸, 侵入于中浅变质岩中, 形成北北东向长 45 km、北东向宽 30 km 的花岗岩岩基, 岩性为黑云母二长花岗岩, 其内部岩性及矿物粒度结构变化较大, 无规律不均匀分布, 包括中细粒少斑黑云母二长花岗岩、中粒斑状黑云母二长花岗岩、中粗粒斑状黑云母二长花岗岩、细粒正长花岗岩, 相互间无明确的侵入关系边界。

宁都白云母伟晶花岗岩赋存在会同岩体西南端, 岩浆上升侵入通道附近的中心相中深根部带。白云母伟晶花岗岩赋存于中粗粒黑云母二长花岗岩中, 由细一中细粒白云母花岗岩、中一粗粒伟晶花岗岩、伟晶岩细脉群组成。

地壳深熔作用是大型造山带构造演化的重要地质作用(Hollister et al, 1986; Hollister, 1993; Brown, 2007)。会同岩体是加里东造山带周潭岩组深熔作用形成的半原地花岗岩(高维敬等, 1994; 张芳荣等, 2009; 江西省地质矿产勘查开发局, 2017), 石英气体包裹体以 COS 等气体为主要成分, 推断深熔作用环境中深部相对封闭还原环境, 熔体的粘度大, 流动性差, 混熔作用受限, 岩浆沿构造薄弱部位近距离迁移上升。

深熔作用由于原岩的差异和不完全混熔, 熔融体极不均匀, 会出现富含长英质的浅色域(熔体)与富含铁镁质的暗色域(熔体)同时存在的现象(图版 II-a), 其中浅色域(熔体)中的矿物粒度明显

变粗,并出现伟晶结构,形态多变,呈不规则团块状(图版 II-a、b)、条带状或脉体(图版 II-c、d)(Brown et al, 1997; Brown et al, 1998; 程裕淇等, 2004),与暗色域(熔体)间界线清楚,但不属于侵入与被侵入关系界线,而是同期产物。浅色域(熔体)与暗色域(熔体)之间只有接触部位发生物质交换,内部保留了原岩的成分,并按照各自的岩浆演化路径成岩,浅色域(熔体)形成的伟晶结构花岗岩是在富含长英质的原岩物质基础上发展演化而成的。

会同岩体内部岩性及矿物粒度结构差异更多的应是原岩物质成分差异、不完全混熔和近距离迁移引起的。

本次研究认为,宁都白云母伟晶花岗岩是由富含长英质的岩石在深熔作用下形成的相对独立的富含长英质花岗岩熔体,伴随会同岩体同期发展演化而成。富含长英质的原岩为白云母伟晶花岗岩提供了重要的硅源,也是保障石英品质及其规模的重要物质基础。

6 结论

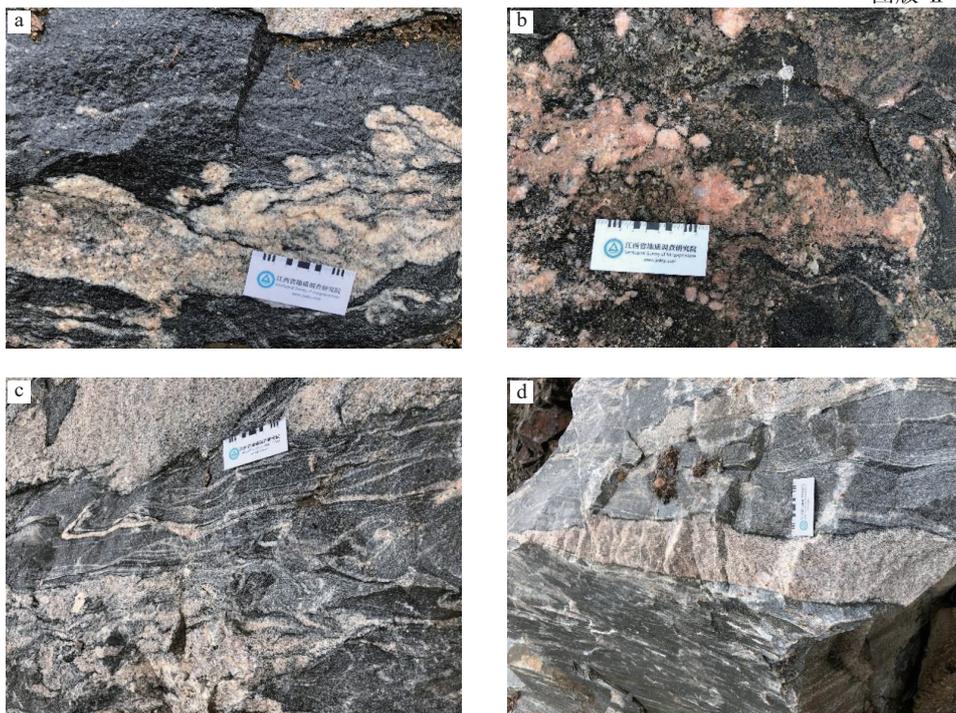
(1)宁都白云母伟晶花岗岩为亚碱性过铝质花岗岩,以钾长石为特征, $K > Na$;具有较高的大离子亲石元素,较低的高场强元素,稀土元素含量较低,稀

土元素总量为 $24.61 \times 10^{-6} \sim 49.19 \times 10^{-6}$,轻稀土元素相对富集, Eu 既有正异常也有负异常, δEu 值为 $0.529 \sim 1.99$;石英矿物内部包裹体以气液包裹体为主,面积占比 1.69%,含少量白云母等矿物包裹体,杂质元素总量低,平均 618.03×10^{-6} ;石英主要晶格杂质 Al、Li、Ti 元素含量 89.82×10^{-6} ,石英纯度达到 SiO_2 99.991%,是优质高纯石英矿物原料。

(2)宁都白云母伟晶花岗岩型高纯石英用硅质原料成矿地质条件与美国 Spruce Pine 白岗岩型高纯石英用硅质原料矿床相似,均为加里东褶皱带 S 型花岗岩高度分异矿床。宁都白云母伟晶花岗岩是由伴随会同岩体同期演化的富含长英质的浅色熔体演化成岩。

(3)宁都地区属于加里东褶皱带武夷隆起西坡,是白云母伟晶花岗岩、伟晶花岗岩和伟晶岩脉集中分布区域,已发现伟晶岩数百条,预测资源量 2600 多万吨,赋存于会同岩体中深根部带的白云母伟晶花岗岩具有形成优质高纯石英的巨大潜力。西武夷山地区是花岗岩型高纯石英用硅质原料找矿有利地区。

江西宁都白云母伟晶花岗岩型高纯石英用硅质原料,由西南科技大学采用“煅烧-自磨-磨矿-浮选-酸浸”选矿提纯试验已经取得 SiO_2 含量



图版 II Plate II

a. 浅色域与暗色域; b. 不规则团块状花岗伟晶结构浅色域; c. 条带状浅色域; d. 脉状浅色域

99.993% 的高纯石英砂, 该矿床预测资源量达到大型规模, 具有极大的开发利用价值。通过开展区域地质背景、矿床地质特征、岩石化学、矿石矿物、石英包裹体和杂质元素、典型矿床对比等研究, 揭示了宁都白云母伟晶花岗岩型高纯石英包裹体和晶格杂质特征, 探讨了矿床成因, 评价了资源潜力, 具有典型矿床对比意义, 对同类型高纯石英用硅质原料矿产调查评价具有指导意义。

中国已将高纯石英高端原料找矿方向聚焦到伟晶岩, 但不同时代、不同成岩条件, 伟晶岩特征差别很大, 其中所赋存的石英矿物特征变化也很大。中国对于白岗岩、白云母伟晶花岗岩等花岗岩型高纯石英用硅质原料矿床成因研究较少, 是否存在白云母伟晶花岗岩岩浆争议也很大。本文抛砖引玉, 以促进花岗岩型高纯石英用硅质原料矿床基础地质研究, 实现找矿突破, 打破资源瓶颈。

致谢: 在江西的高纯石英资源调查与科研过程中, 团队得到了中国地质调查局、中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所、江西省自然资源厅、江西省科学技术厅、江西省地质局和江西省地质调查勘查院众多老专家、老领导的信任和支持, 带着这份信任与支持, 团队走过了艰难的三年多历程, 以不畏艰险、敢于克难, 甘于寂寞、潜心钻研的团队精神, 努力着奋斗着。相关科研工作仍在继续, 成果也将陆续总结发表, 在此对陈丛林、耿林、张海啟、谭秀民、楼法生、于晓飞、余忠珍、言会、王先广、唐维新等专家教授, 以及所有给予帮助支持的老专家、老领导、科研人员表示深切的谢意。感谢审稿专家的宝贵意见, 对修改工作的帮助, 以及进一步研究工作的指导。

参考文献

- Broad Hurst S D. 1954. A report on the high-silica sand resources of North Carolina [N]. North Carolina Department of Conservation and Development: 1-35.
- Brobst D A. 1962. Geology of the Spruce Pine District Avery, Mitchell, and Yancey Counties, North Carolina [M]. Washington: United States Government Printing Office, Geological Survey Bulletin, 1122-A: 1-26.
- Brown M, Rushmer T. 1997. The role of deformation in the movement of granite melt: Views from the laboratory and the field, in Holness M B, ed., Deformation-Enhanced Fluid Transport in the Earth's Crust and Mantle[M]. The Mineralogical Society Series 8: London, Chapman and Hall: 111-144.
- Brown M, Solar G S. 1998. Shear zone systems and melts: Feedback relations and self-organization in orogenic belts[J]. *Journal of Structural Geology*, 20: 211-227.
- Brown M. 2007. Crustal melting and melt extraction, ascent and emplacement in orogens: mechanisms and consequences[J]. *Journal of the Geological Society*, 164: 709-730.
- Götze J. 2012. Quartz: Deposits, mineralogy and analytics[M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: 1-355.
- Hollister L S, Crawford M L. 1986. Melt-enhanced deformation: A major tectonic process[J]. *Geology*, 14(7): 558-561.
- Hollister L S. 1993. The role of melt in the uplift and exhumation of orogenic belts[J]. *Chemical Geology*, 108: 31-48.
- Sun S S, Mc Donough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implication for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313-345.
- 程裕淇, 杨崇辉, 万渝生, 等. 2004. 太行山中北段早前寒武纪地质和深熔作用对地壳岩石的改造[M]. 北京: 地质出版社: 100-143.
- 崔圆圆, 赵志丹, 蒋婷, 等. 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.
- 邓晋福, 赵海玲, 赖绍聪, 等. 1994. 白云母/二云母花岗岩形成与陆内俯冲作用[J]. *地球科学—中国地质大学学报*: 19(2): 139-147.
- 高维敬, 方宗斌, 刘邦秀. 1994. 武夷山西坡花岗岩类深成侵入体的岩石谱系[J]. *江西地质*, 8(4): 281-295.
- 郭文达, 韩跃新, 朱一民, 等. 2019. 高纯石英砂资源及加工技术分析[J]. *金属矿山*, (2): 22-28.
- 江西省地质矿产勘查开发局. 2017. 中国区域地质志·江西志[M]. 北京: 地质出版社: 725-738, 840-841.
- 金达表, 张兄明, 邹蔚蔚. 2004. 高纯石英的加工工艺研究[J]. *中国非金属矿工业导刊*, (4): 44-48.
- 李金超, 栗亚芝, 孔会磊. 2023. 中国高纯石英产业链现状及发展建议[J]. *西北地质*, 56(5): 214-222.
- 马超, 冯安生, 刘长森, 等. 2019. 高纯石英原料矿物学特征与加工技术进展[J]. *矿产保护与利用*, 39(6): 48-57.
- 桑隆康, 马昌前. 2001. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社: 83-84.
- 汪灵, 李彩侠, 王艳, 等. 2011. 我国高纯石英加工技术现状与发展建议[J]. *矿物岩石*, 31(4): 110-114.
- 汪灵, 李彩侠, 王艳, 等. 2013. 高纯石英质量的 ICP 检测技术研究与应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 33(6): 1684-1688.
- 汪灵, 党陈萍, 李彩侠, 等. 2014. 中国高纯石英技术现状与发展前景[J]. *地学前缘*, 21(5): 267-273.
- 杨军. 2004. 高纯石英玻璃纯度与粘度的关系美国尤尼明高纯石英砂产品介绍[C]// 第二届高新技术用石英制品及相关材料技术与市场研讨会: 85-97.
- 张晔, 陈培荣. 2010. 美国 Spruce Pine 与新疆阿尔泰地区高纯石英伟晶岩的对比研究[J]. *高校地质学报*, 16(4): 426-435.
- 张佩聪, 刘岫峰, 李峻峰, 等. 2012. 高纯石英矿物资源工程研究[J]. *矿物岩石*, 32(2): 38-44.
- 张芳荣, 舒良树, 王德滋, 等. 2009. 华南东段加里东期花岗岩类形成构造背景探讨[J]. *地学前缘*, 16(1): 248-260.
- 曾勇. 2000. 西武夷地区早古生代浅色花岗岩的厘定及其造山意义[J]. *江西地质*, (1): 1-4.