

钨中找铍—南岭石英脉型钨铍矿化的发现及其找矿意义

王炯辉

中国五矿集团有限公司，中国北京 100010

摘要：铍（Be）是支撑航空航天、国防军工和核能源发展的关键稀有金属，但我国铍资源禀赋差、对外依存度高，勘查找矿形势严峻。南岭成矿带广泛发育与高分异花岗岩有关的岩浆热液成矿作用，形成了我国最重要的钨、锡、稀有金属等多金属成矿带。高程度分异的花岗岩同样具有形成铍等多种战略性矿产的潜力，但目前南岭地区铍资源的成矿富集特点和找矿前景尚不明确。本文在铍元素富集规律和全温度域成矿理论的指导下，以南岭瑶岗仙高分异花岗岩岩浆热液系统为突破口，新发现大量与高品位石英脉型钨矿共生的细粒-中粗粒绿柱石。矿物学和地球化学研究表明，这些绿柱石属于无碱绿柱石，晶格中存在 Fe-Mg 与 Na-Cs 对 Al 的耦合替代，是高分异岩浆演化至中高温热液阶段的产物。该类型钨铍矿化在“五层楼”式黑钨矿矿床深部广泛分布，具有较大成矿潜力、资源综合利用价值高。瑶岗仙石英脉型钨铍矿化的首次发现将为南岭钨矿区铍的成矿富集机制与找矿方向提供重要依据。

关键词：铍矿；绿柱石；全温度域成矿；石英脉黑钨矿；南岭成矿带

中图分类号：P611；P612

收稿日期：2026-3-27

Finding Beryllium in Tungsten: Discovery of Quartz-Vein-Type W-Be Mineralization in Nanling and Its Exploration Implications

Wang Jionghui

China Minmetals Corporation, Beijing 100010, China

Abstract: Beryllium (Be) is a strategic rare metal indispensable for aerospace, defense, and nuclear energy. China's limited domestic reserves and high external dependency necessitate urgent breakthroughs in beryllium exploration. The Nanling Metallogenic Belt, a premier W-Sn-rare metal province, is genetically linked to the magmatic-hydrothermal evolution of highly fractionated granites. While these highly evolved granites possess significant potential for Be mineralization, the enrichment mechanisms and exploration prospects in this region remain poorly constrained. Guided by Be-enrichment patterns and "full-temperature range" mineralization theory, this study targets the Yaogangxian magmatic-hydrothermal system. We report the discovery of abundant fine-to-coarse-

作者简介：王炯辉（1964- ），男，研究员，长期从事资源勘查开发和新技术矿产研究及开发利用等工作，E-mail: wangjh@minmetals.com, ORCID: 0009-0003-3099-4851

grained beryl coexisting with high-grade quartz-vein wolframite. Mineralogical and geochemical evidence characterizes these as alkali-free beryl, where (Fe, Mg) and (Na, Cs) undergo coupled substitution for Al in the crystal lattice. We propose that this mineralization resulted from mid-to-high temperature hydrothermal fluids exsolved during advanced magmatic fractionation. This Be-W paragenesis is widely distributed in the deeper sections of "five-story" type tungsten deposits, representing substantial resource potential and high value for comprehensive mineral utilization. The first findings at Yaogangxian provide a critical scientific framework for deciphering Be-enrichment mechanisms and guiding strategic exploration in the Nanling tungsten province.

Keywords: beryllium, beryl, full-temperature-range metallogenic model, quartz-vein type tungsten deposits, Nanling range

0 引言

铍(Be)作为一种战略性关键金属及新技术矿种(王炯辉, 2025), 因其可制造陀螺仪、高精度光学镜片、中子倍增剂、高强度铍铜(铝)合金等关键材料, 在航空航天、核工业及高端电子器件等领域具有不可替代的作用, 被誉为“超级金属”、“尖端金属”、“空间金属”。全球铍资源储量分布极不均衡, 大型或超大型铍矿床几乎集中于美洲。我国铍资源虽然较为丰富, 但独立矿床较少, 多以共伴生形式产出, 且普遍存在品位较低、选冶难度大的问题(梁飞等, 2018)。目前, 全球商业性铍资源供应主要依赖产在美国的羟硅铍石矿和巴西的绿柱石矿, 而我国铍资源市场对外依存度长期保持在较高水平(>80%), 严重制约未来新兴技术产业发展。因此, 加强铍矿的资源评价及找矿勘查, 对保障我国战略资源安全具有极为紧迫的现实意义。

中国已探明铍矿资源主要分布在 16 个省(区), 其中新疆、四川、江西和湖南的总资源储量占全国 80%以上, 形成新疆阿尔泰及邻区铍成矿带、川西铍成矿带和南岭铍成矿带三个主要成矿区域(李建康等, 2017; 梁飞等, 2018)。近年来, 我国依托重大科技专项和新一轮找矿突破战略行动, 在含铍的三稀金属的成矿规律研究与找矿勘查方面取得重要突破。例如, 在喜马拉雅东段错那洞片麻岩穹窿构造系统中发现超大型 Be-Sn-W 多金属矿床(李光明等, 2017)。铍矿化的富集机理被认为多受控于花岗质岩浆的高程度结晶分异与热液演化过程(李建康等, 2017; 李晓峰等, 2021)。因此, 与高分异花岗岩有关的岩浆-热液成矿系统是实现铍资源找矿突破的关键切入点。

南岭成矿带是我国重要的 W-Sn-Pb-Zn 等多金属成矿区域, 与区内广泛发育的花岗岩在时间和空间上密切相关, 其中高分异花岗岩主导了强烈的 W-Sn 和 Li-Be-Nb-Ta 等稀有金属矿化(e.g., 毛景文等, 2007; 陈骏等, 2014; 吴福元等, 2023; Wang et al., 2025)。南岭成矿带内铍矿化类型包括与 Li-Nb-Ta 矿化共生产出的伟晶岩型矿床, 如幕阜山 Li-Be-Nb-Ta 矿(李

鹏等, 2017; Xiong et al., 2024)、一六 Be 矿床(秦锦华等, 2022); 也发育与 W-Sn 矿共生, 以花岗岩型(如江西大吉山 W-Be 矿)和热液型(如湖南香花岭和柿竹园矽卡岩型 Be 矿)(李建康等, 2017; 赵一鸣等, 2017)为代表。石英脉型黑钨矿是我国最常见的钨工业开采类型, 也是南岭中段瑶岗仙钨矿最具代表性且具有大型规模的钨矿类型, 其形成机制多被认为与花岗质岩浆高分异演化形成的中高温岩浆-热液体系密切相关(倪培等, 2023)。Be-Li-Cs 等元素成矿往往需要花岗质岩浆高分异演化的分异演化(Ballouard et al., 2016), 而钨稳定同位素等指标表明瑶岗仙岩体就是这类高分异岩体的典型代表(Wang et al., 2025), 并已经发育大规模的钨成矿, 因此同样具有形成铍矿化的潜力。然而, 针对石英黑钨矿脉中含铍矿物的分布和成因机制尚未有系统研究, 制约了瑶岗仙矿山深部铍资源的勘查找矿和综合利用

笔者在水口山 Pb-Zn-Au-Ag 多金属矿田和黄沙坪 Pb-Zn-W-Mo 多金属矿床等典型矿床基础上, 建立了与花岗岩分异成熟度密切相关的涵盖高温岩浆热液系统派生的 W-Sn-Mo-Nb-Ta-Be 矿化和中低温成矿热液系统的 Pb-Zn-Au-Ag 矿化的全温度域成矿模式, 据此指导老矿山深边部找矿工作, 在南岭中段新探获大型规模铅锌、金、银、钨、萤石资源, 也进一步表明南岭地区成矿岩浆和金属矿物组合的多样性, 后续找矿工作有望在更高温的 Li-Nb-Ta-Be 和低温 Sb-Au-Ag 矿种领域取得突破(王炯辉, 2024)。根据全温度域成矿理论模型, 高分异岩浆热液成矿体系中石英脉型黑钨矿“五层楼”的深部成矿温度条件满足含铍矿物的形成, 是潜在成矿空间。因此, 本文优选湘南地区瑶岗仙矿床石英脉型黑钨矿成矿系统作为研究对象, 系统评估铍元素富集成矿的基本特征, 调查了含铍矿物绿柱石的分布特征并进行成因机制研究, 以期深化岩浆热液型铍矿化成矿机理, 并为南岭成矿带铍资源的找矿突破提供勘查方向。

1 铍资源成矿地质属性

铍于 1798 年被法国化学家沃克兰(L. N. Vanquelin, 1763-1829)发现, 位于化学元素周期表第二周期第二主族, 是最轻的碱土金属元素, 属于稀有金属矿种(表 1)。铍具有 12 种同位素, 其中 ^9Be 是唯一的稳定同位素, 在铍的放射成因同位素中, 稳定性最高的是 ^{10}Be 和 ^7Be : 前者半衰期为 139 万年, 后者半衰期约 53 天; 其余大多数同位素的衰变时间仅为数毫秒(Foley et al., 2017)。此外, 铍的电荷密度介于 Al 和 Si 之间, 但是由于其极小的离子半径(0.27 Å), 极强的共价键属性, 以及价态特征(+2)使得铍难以通过类质同象置换硅酸盐矿物中的常见元素, 因此具有高度不相容性质, 不进入大多数造岩矿物(如黑云母、碱性长石、石英和斜长石)。

铍在地壳元素丰度中排名第 47 位, 广泛分布于各类岩石中。铍作为亲石元素, 易与氧结合形成氧化铍化合物, 导致其在地壳中相对富集而非进入地核。铍在大陆地壳(1.4~2.29 $\mu\text{g/g}$)(Rudnick and Gao, 2014)的丰度超过原始地幔(0.068 $\mu\text{g/g}$)(McDonough and Sun,

1995) 约 40 倍。这也初步解释了相较于地幔组分, 高度演化的火成岩、花岗伟晶岩及碱性岩中铍含量显著升高的现象。在花岗岩中, 铍的平均含量从黑云母花岗岩的 5 $\mu\text{g/g}$ 到白云母及二云母花岗岩的 10 $\mu\text{g/g}$ 不等 (Foley et al., 2017)。霞石正长岩及富含氟的黄玉流纹岩较之常见长英质岩石具有更高的铍富集程度。例如, 俄罗斯 Murmansk Oblast 州 Lovozero 地区的碱性岩铍含量约为 3 $\mu\text{g/g}$ 至 24 $\mu\text{g/g}$, 美国西部部分富氟黄玉火山岩的平均铍含量达 50 $\mu\text{g/g}$ (Foley et al., 2017)。某些特定岩性可出现极端富集现象: 格陵兰南部 Ilímaussaq 杂岩体中的过碱性霞石正长岩铍含量为 7 $\mu\text{g/g}$ 至 44 $\mu\text{g/g}$, 其中部分岩石的铍含量介于 330 $\mu\text{g/g}$ 至 1970 $\mu\text{g/g}$ 之间 (Engell et al., 1971)。大多数富铍伟晶岩的全岩铍含量为 <250 ~ 420 $\mu\text{g/g}$ (London and Evensen, 2002), 而部分钠长石伟晶岩的全岩铍含量可达 360 $\mu\text{g/g}$ 至 720 $\mu\text{g/g}$ (Černý, 2002)。热液作用可进一步促使伟晶岩与火山成因体系中铍的富集。例如, 科罗拉多州 Boomer Mine 花岗岩岩基周围的蚀变岩 (云英岩) 中铍含量最高达 2.3 wt.%, 犹他州 Spor Mountain 受热循环水交代蚀变的火山凝灰岩中铍含量可达 3600 $\mu\text{g/g}$ (Foley et al., 2012)。

表 1 铍元素基本化学属性

Table 1 Basic chemical properties of beryllium element

名称	属性特征
英文名称	Beryllium
元素符号	Be
原子序数	4
相对原子质量	9.012182
元素序列	碱土金属
电子结构	[He]2S ²
离子价态	+2 价为主, 极少+1 价 (BeH)
离子半径	0.27 Å
电负性	1.57
第一电离能	932 kJ/mol
沸点	2469 °C
熔点	1287 °C
晶体结构	六边形
地球化学属性	亲石性

铍的赋存状态受控于其地球化学性质。铍是一种典型的双性元素, 既可在酸性环境中呈阳离子形式存在, 也可在碱性环境中与碱 (土) 金属结合形成复杂阴离子-络阴离子 (Černý, 2002)。此外, 铍由于在晶体晶格中不易被其它元素置换, 因此倾向于形成独立矿物。目前自然界发现铍的独立矿物有 120 余种, 包括铍的氧化物、硅酸盐、磷酸盐、氢氧化物、硼酸盐、砷酸盐等矿物 (Černý, 2002; 饶灿等, 2022a)。具有经济价值的三种最常见含铍矿物分别为绿柱石 ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$)、羟硅铍石 ($\text{Be}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2$) 和硅铍石 (Be_2SiO_4)。绿柱石常是中高温条件下形成于侵入岩与变质岩中的主要含铍矿物; 而羟硅铍石和硅铍石则是中低温条件下形成的主要矿石矿物。

我国铍矿床可划分为与岩浆系统有关的内生矿床, 与风化作用相关的外生矿床和与沉积变质相关的变质矿床三大类。内生岩浆系统的铍资源根据铝饱和指数 ($A/\text{CNK} =$

$(Al_2O_3/(Na_2O + K_2O + CaO))_{mol}$)分为过铝性、偏铝性和碱性成矿系统(Barton and Young, 2002), 并依据岩浆热液演化序列细分为岩浆型、伟晶岩型和热液型(矽卡岩型、云英岩型和石英脉型等)(李建康等, 2017)。此外, 不同地质环境和岩石类型形成的铍矿资源类型也有所不同。与过碱性花岗岩或伟晶岩有关的铍矿体呈脉状或囊状产出, 矿物以绿柱石和硅铍石为主; 与酸性花岗岩有关的铍矿化主要集中在高温矽卡岩带或云英岩带, 出现大量绿柱石、硅铍石和少量羟硅铍石; 与火山岩活动有关的铍矿化通常弥散分布在火山岩蚀变带中, 形成以羟硅铍石为主的中低温热液矿床。此外, 部分岩浆热液型铍矿物可能发生风化, 形成含铍砂砾层。

全球已探明的铍资源储量据估算已超过 10 万吨, 其中约 60%的资源分布在美国, 巴西、中国、俄罗斯、莫桑比克等也有铍资源分布, 工业产能则大部分集中在美国、中国和巴西 (<https://www.usgs.gov/>)。美国目前开采的主要含铍矿物为铍质量分数约为 15 wt.%的羟硅铍石, 矿石中铍的品位多低于 0.5%。相反, 铍质量分数最高可达 5 wt.%的绿柱石则是世界其他地区(包括中国、巴西、马达加斯加、莫桑比克、尼日利亚、葡萄牙和卢旺达)开采的主要含铍矿物, 其矿石品位通常在 2%至 4%之间。截止目前, 我国发现的主要铍矿床类型为伟晶岩型和热液型, 集中分布在传统铍资源产地阿尔泰和南岭地区。新疆白杨河发现火山岩型铍矿床, 资源量虽大但羟硅铍石颗粒细小、矿物嵌合复杂, 需要更复杂的选别工艺, 短期内商业开发难度较大。相较而言, 绿柱石颗粒经过手选或常规浮选即可回收。因此, 随着阿尔泰地区铍资源量日益消耗减少, 寻找新的可利用铍资源尤其是绿柱石铍矿床已成为找矿突破的关键目标。

2 矿床地质特征

南岭成矿带又称南岭花岗岩带或南岭构造带, 位于华南板块中南部, 以发育燕山早期的爆发式成岩成矿作用为特色, 不仅分布大量的钨、锡、铜、钼、铅、锌、金、银等金属矿床, 也是锂、铍、铌、钽等稀有金属和稀土元素等战略性矿产资源的重要产地(图 1)(e.g., 陈骏等, 2014; 蒋少涌等, 2020; 倪培等, 2023; 胡瑞忠, 2024; 吴俊华等, 2025)。区域目前已发现 70 余种矿产, 近 3000 处矿产地, 其中大型-超大型以上规模 100 余处, 中型规模矿产地 400 余处, 小型及以下 200 余处(秦锦华等, 2024)。绝大多数有色金属矿床的形成与同期花岗质岩浆作用密切相关, 其中钨、锡和稀有金属矿化多受控于高分异花岗岩的岩浆-热液演化过程, 往往形成矿化类型多样、矿种组合多样的成矿系统。

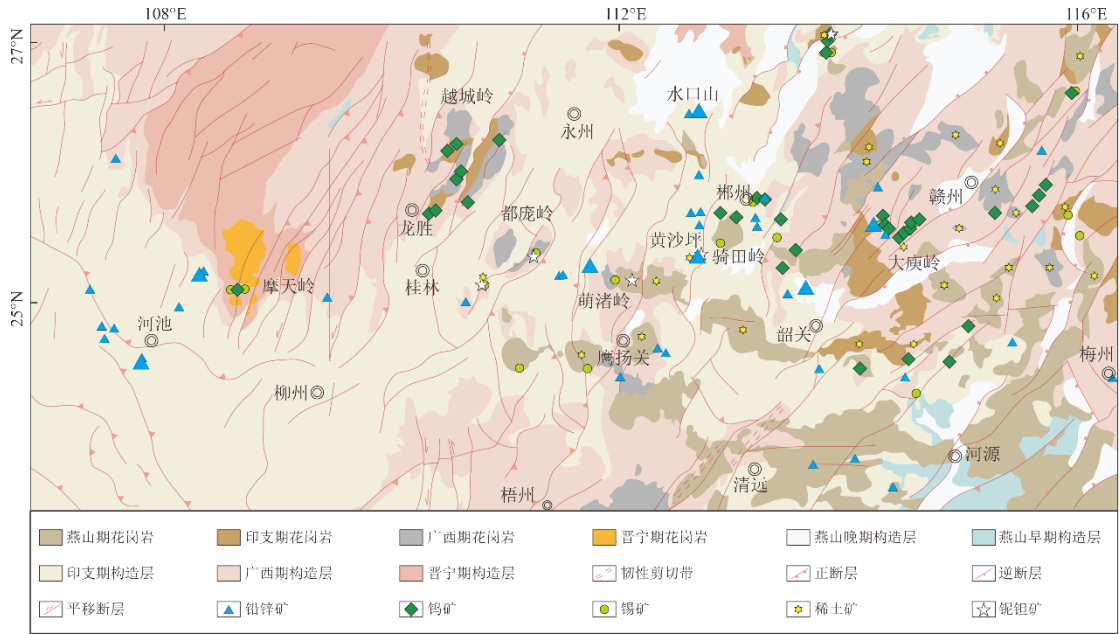


图 1 南岭成矿带内典型金属矿产分布示意图 (据徐先兵等, 2021 修改)

Fig. 1 Schematic distribution of typical metallic mineral deposits in the Nanling metallogenic belt (modified after Xu et al., 2021).

瑶岗仙矿床位于湖南省郴州市南约 35 km 处, 构造位置地处南岭东西复杂构造带北端, 加里东隆起带与印支-燕山拗陷带的交汇地带, 毗邻郴州-临武断裂, 位于骑田岭岩体外围。瑶岗仙矿床同时发育石英脉型黑钨矿化和矽卡岩型白钨矿化, 两者均已达到大型规模。复式花岗岩体由中粗粒黑云母花岗岩、中细粒二云母花岗岩和细粒白云母花岗岩组成(董少花等, 2014)。矽卡岩型白钨矿化分布于瑶岗仙钨矿床东段和尚滩地区(图 2), 矿体主要赋存于岩体外接触带的跳马涧组砂岩及棋梓桥组底部灰岩之间。石英脉型黑钨矿主要分布于瑶岗仙复式岩体的北侧、西北侧、西侧, 矿体集中分布在内接触带的花岗岩体以及外接触带的泥盆系、寒武系地层, 以及侏罗系砂岩中, 呈北北西、北西和北西西三组走向沿断裂分布(图 2)。

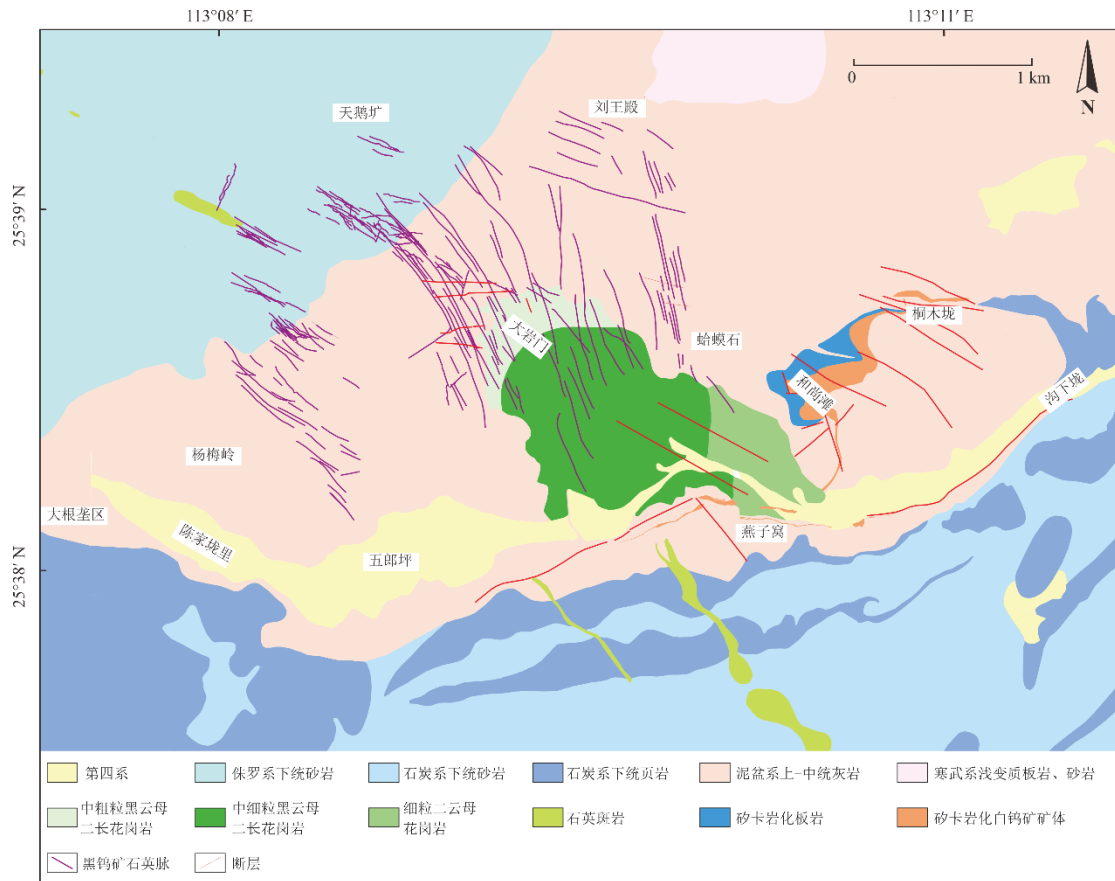


图 2 瑶岗仙钨矿床矿区地质简图 (据董少花等, 2014 修改)

Fig. 2 Simplified geological map of the Yaogangxian tungsten deposit (modified after Dong et al., 2014)

花岗岩的高度分离结晶演化为瑶岗仙石英脉型黑钨矿的形成提供了关键物质来源(董少花等, 2014; Wang et al., 2025), 成矿岩浆出溶的热液流体沿围岩的裂隙充填形成石英黑钨矿脉(蒋少涌等, 2020)。前人基于南岭地区黑钨矿床的长期找矿实践总结出脉状黑钨矿的“五层楼”分带找矿模式, 即从上往下可分为线脉带、细脉带、细脉-大脉混合带、大脉带和尖灭带五个矿脉分带(韦龙明等, 2018)。随后进一步提出“五层楼+地下室”找矿模型, 主要包括上部的石英脉型钨矿化和深部的云英岩型钨矿化(王登红等, 2010)。瑶岗仙矿床黑钨矿系统是湘南地区典型的“五层楼”成矿模式。

本文研究的绿柱石样品产自瑶岗仙石英脉型黑钨矿矿床。野外及矿山井下地质调查发现绿柱石主要赋存在脉状黑钨矿“五层楼”的中下部细脉和大脉间, 和黑钨矿类似均在空间上分布不均匀。绿柱石可形成微细粒集合体呈脉体侵入寒武系砂岩地层中, 二者接触界限截然且砂岩地层围岩未发生明显热液蚀变作用(图 3a)。绿柱石也可呈针状或柱状颗粒集合体与石英交织生长, 共同侵入至砂岩地层围岩中(图 3b)。柱状绿柱石多为自形结构(图 3b-f), 粒径在 0.1 ~ 3 cm 之间, 浅绿色至浅白色, 纵裂纹发育。绿柱石的产出多与云母、黑钨矿、辉钼矿、锡石、黄铁矿、毒砂、黄铜矿、萤石等矿物共生(图 3c-f), 在背散射图像(BSE)中呈现均一结构(图 4)。值得注意的是, 这些绿柱石的颜色整体非常淡, 夹杂在石英脉中

往往难以被识别出来（图3），这可能是过去关注薄弱的的一个原因所在。

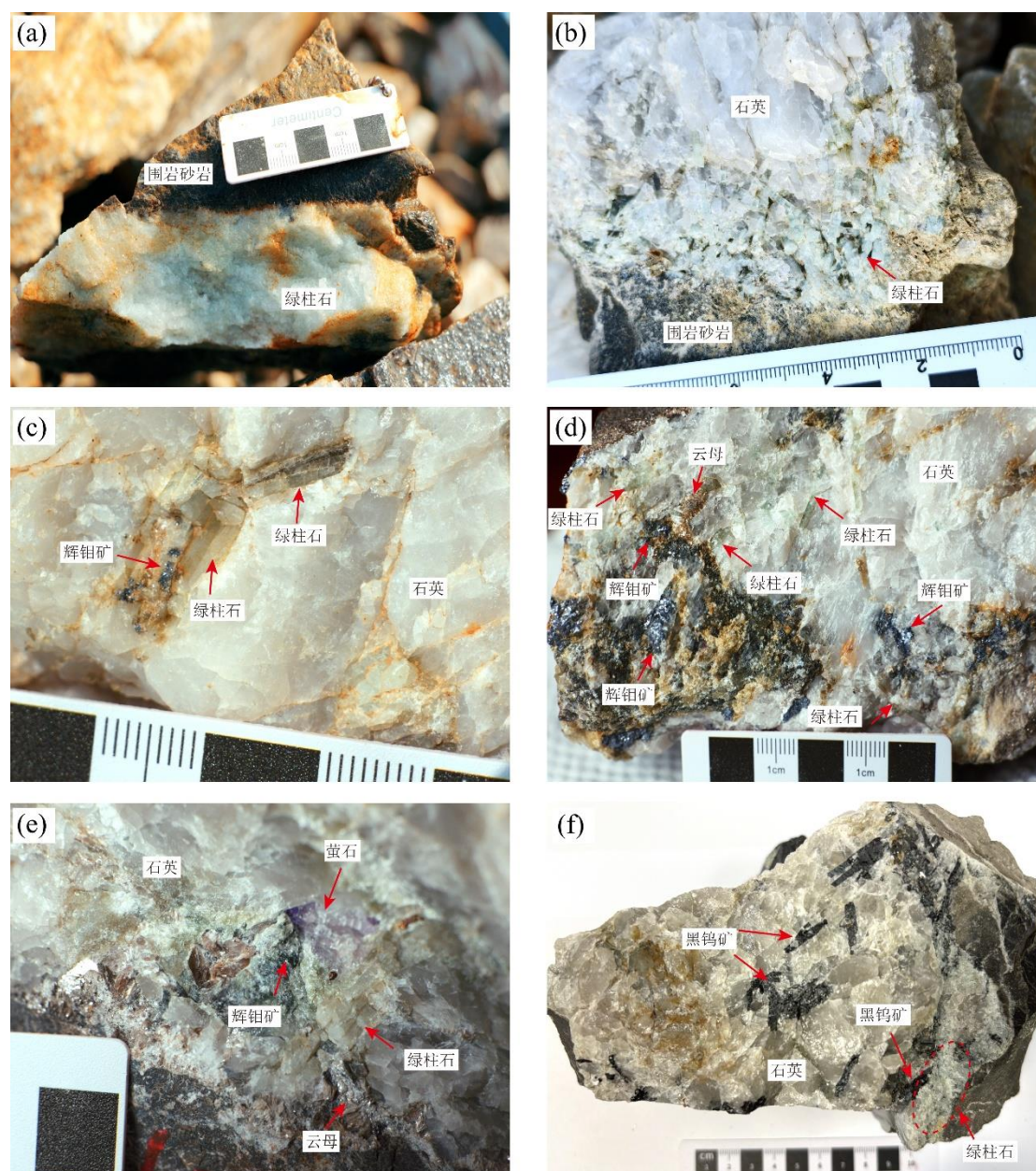


图3 南岭石英脉型黑钨矿中绿柱石的典型特征。(a) 穿插在灰黑色砂岩围岩中的细粒集合体绿柱石脉；(b) 和石英共生的中粗粒柱状绿柱石集合体；(c-f) 绿柱石和石英、辉钨矿、云母、萤石、黑钨矿等矿物产出关系

Fig. 3 Representative characteristics of beryl in the quartz-vein-type wolframite deposit, Nanling. (a) Fine-grained beryl aggregate veins interspersed in gray-black sandstone wall rock; (b-f) Paragenetic relationships among beryl, quartz, molybdenite, mica, fluorite, and wolframite

3 分析方法

本次研究对从瑶岗仙石英脉型黑钨矿区采集的 4 件含绿柱石的石英脉矿石样品进行细致的矿物学观察和背散射电子图像（BSE）拍摄，并利用电子探针（EMPA）和激光剥蚀-电

感耦合等离子质谱仪 (LA-ICP-MS) 对代表性绿柱石颗粒分别进行原位主量元素和微量元素分析。

绿柱石原位主量元素和微量元素分析均在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。原位主量元素分析采用日本电子 JXA-8230 型电子探针完成, 本次分析的工作电压和电流分别为 15 kV 和 20 nA, 束斑直径 3 μm , 背景测试时间为 5 s, 各元素峰值测试时间为 10 s。主量元素含量的校正标样使用由 SPI 公司提供的天然矿物或合成氧化物, 数据校正方法采用日本电子的 ZAF 校正方法进行修正。绿柱石的晶体化学式依据 18 个 O 原子计算。本文考虑到电子探针一般不能测定超轻元素 Li、Be (张文兰等, 2022), 且绿柱石中大多数元素含量较低, 除 Si、Al、Fe 和 Na 采用电子探针数据外, 其余元素均采用 LA-ICP-MS 获得的数据。

绿柱石原位微量元素分析采用 GeolasPro 激光剥蚀系统和 Agilent 7900 型 ICP-MS 联用进行, 使用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度。本次分析的激光束斑和频率分别为 44 μm 和 5 Hz, 能量密度为 5.5 J/cm²。每个样品点的分析数据包括约 20-30 s 空白信号和 50 s 样品信号。选取标准玻璃 NIST610 作为外标, 并使用电子探针测试的绿柱石 ²⁹Si 含量作为内标来校正质量歧视和仪器灵敏度漂移。采用 BHVO-2G, BCR-2G、GSE-1G 和 BIR-1G 作为监控样来校准分析元素的灵敏度和准确度。对分析数据的离线处理 (包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正以及元素含量计算) 采用软件 Iolite v4 完成 (Paton et al., 2011)。

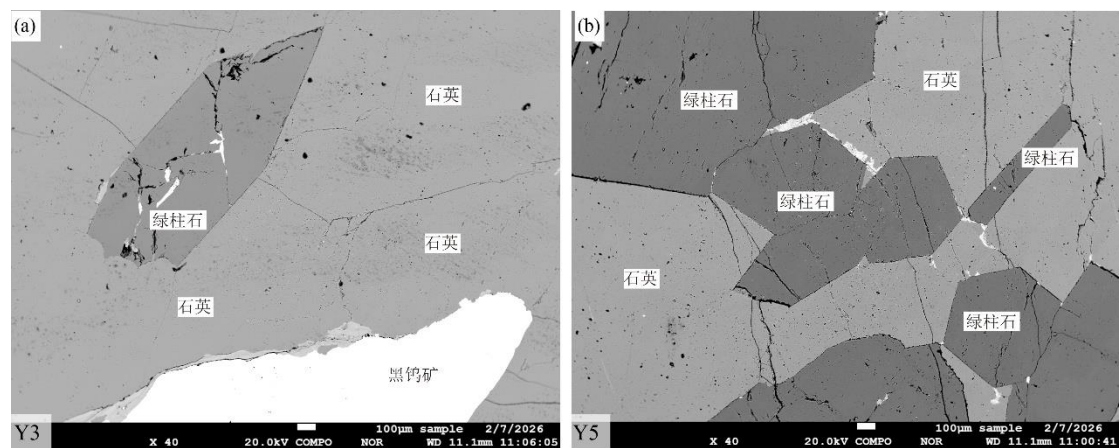


图 4 背散射 (BSE) 下绿柱石结构及和石英-黑钨矿共生组合关系

Fig. 4 Backscattered electron (BSE) images showing beryl textures and their paragenetic relationships with quartz and wolframite

4 绿柱石成分分析结果

随机选取 4 件样品中 23 个自形绿柱石颗粒进行原位主量元素和微量元素分析的测试, 结果见附表 1。所有分析点具有差异不大的 SiO₂ (65.7 ~ 66.6 wt%, 平均值为 66.2 wt%)、Al₂O₃ (17.5 ~ 18.5 wt%, 平均值为 18.2 wt%) 和 BeO (13.4 ~ 15.0 wt%, 平均值为 14.4 wt%)

含量, 非常接近标准绿柱石的化学组成 ($\text{SiO}_2 = 67.1 \text{ wt}\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 19.0 \text{ wt}\%$, $\text{BeO} = 14.0 \text{ wt}\%$)。这些绿柱石颗粒含有一定量的铁镁质和碱金属。其中, FeO ($0.19 \sim 0.63 \text{ wt}\%$, 平均值 $0.33 \text{ wt}\%$)、 Mg ($238 \sim 497 \mu\text{g/g}$, 平均值 $703 \mu\text{g/g}$)、 V ($13.5 \sim 318 \mu\text{g/g}$, 平均值 $130 \mu\text{g/g}$)、 Cr (含量基本低于检测限) 含量相对偏低。同样, 绿柱石中碱金属元素含量也相对偏低, Na_2O 含量在 $0.13 \sim 0.43 \text{ wt}\%$ 之间, 平均值 $0.25 \text{ wt}\%$; Li 含量为 $76.9 \sim 364 \mu\text{g/g}$, 平均值 $79 \mu\text{g/g}$; K 含量为 $32.6 \sim 218 \mu\text{g/g}$, 平均值 $107 \mu\text{g/g}$; Rb 含量 $2.4 \sim 85.6 \mu\text{g/g}$, 平均值 $39.3 \mu\text{g/g}$; Cs 含量 $115 \sim 1078 \mu\text{g/g}$, 平均值 $495 \mu\text{g/g}$ 。此外, 绿柱石颗粒中还有少量 Sc 、 Ti 、 Mn 、 Ga 、 Zn 和 P , 其余微量元素 (如 Ba 、 Ca 、 Sr 、 REE 等) 基本低于检测。

5 讨论

5.1 绿柱石形成机制

绿柱石单位晶胞内的多个位置可以发生类质同象替换而富集大量的主量和微量元素 (Turner et al., 2007)。本次研究的绿柱石分析点显示 Fe 、 Mg 与 Al 具有良好的负相关关系, 同时 Na 和 Cs 与 Fe 、 Mg 均显示良好的正相关关系 (图 5), 表明绿柱石中 Al 被 Fe 和 Mg 进行类质同象替换, 同时 Na 和 Cs 作为电价补偿进入绿柱石晶格中。通常, Li 和绿柱石晶胞中 Be 进行类质同象置换, 同时需要一价碱金属元素 (如 Na 、 Cs 等) 进行电价补偿, 但由于本次研究的绿柱石含有较低的 Li 含量, 因此 Na 、 Cs 与 Li 并没有显示明显的线性相关关系。

本文研究的绿柱石中碱金属元素含量 ($\text{R}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{O} + \text{Li}_2\text{O} + \text{Cs}_2\text{O}$) 在 $0.17 \sim 0.57 \text{ wt}\%$ 之间, 绝大多数低于 $0.5 \text{ wt}\%$, 均属于无碱绿柱石 (Cerny et al., 2003)。绿柱石的微量元素可以用来反演其形成的温度条件, 通常来说高温环境下 ($>300 \text{ }^\circ\text{C}$) 形成的绿柱石富集 Ti 、 Cr 、 V 、和 Ta , 而中低温环境下 ($200 \sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$) 则会富集 Cu 和 Zn (Xiong et al., 2017)。本文绿柱石的 Ti 、 Cr 和 V 含量显著高于湘东地区白沙窝矿区内形成于高温环境的绿柱石, 且 Cu 和 Zn 含量相较更低, 暗示本文的绿柱石形成于高温环境 (Fan et al., 2022)。此外, 绿柱石多与石英、黑钨矿、毒砂及辉钼矿 (图 3) 等中高温矿物的共生产出。综合表明本次研究的绿柱石属于典型的岩浆热液型绿柱石, 与云南麻花坪钨矿床产出在浅变质碎屑岩中的绿柱石-黑钨矿-石英脉相似 (闫阔等, 2025)。

与岩浆作用有关的绿柱石通常随岩浆演化程度的升高会显示 Cs 含量和 Cs/Na 比值升高、 Mg 含量和 Mg/Fe 比值降低的趋势 (Cerny et al., 2003; Uher et al., 2012; 周起凤等, 2019)。因此, 伟晶岩型绿柱石的 Cs/Na 和 Mg/Fe 比值被用来反映伟晶岩中岩浆的结晶分异程度, 而部分具有高 Mg/Fe 比值的绿柱石被认为是围岩混染导致的 (陶湘媛等, 2020)。本文研究的岩浆热液型绿柱石的 Cs/Na 和 Mg/Fe 摩尔比值分别为 $0.015 \sim 0.098$ 和 $0.38 \sim 0.84$, 落入喜马拉雅淡色花岗岩带伟晶岩型绿柱石的比值范围 (陶湘媛等, 2020), 表明其母岩浆具有

类似伟晶岩的高分异特征。与国内其他地区的岩浆热液型绿柱石（如陕西核桃坪石英脉型、云南麻花坪矽卡岩型和石英脉型）相比（代鸿章等, 2019; 闫阔等, 2025），本文研究的绿柱石具有类似的 Cs/Na 比值但明显偏低的 Mg/Fe 比值，暗示形成绿柱石的热液流体受围岩混染的程度较低。综上所述，笔者认为本文研究的绿柱石与共生的黑钨矿均是高分异花岗岩出溶热液流体演化至中高温条件下形成的产物。

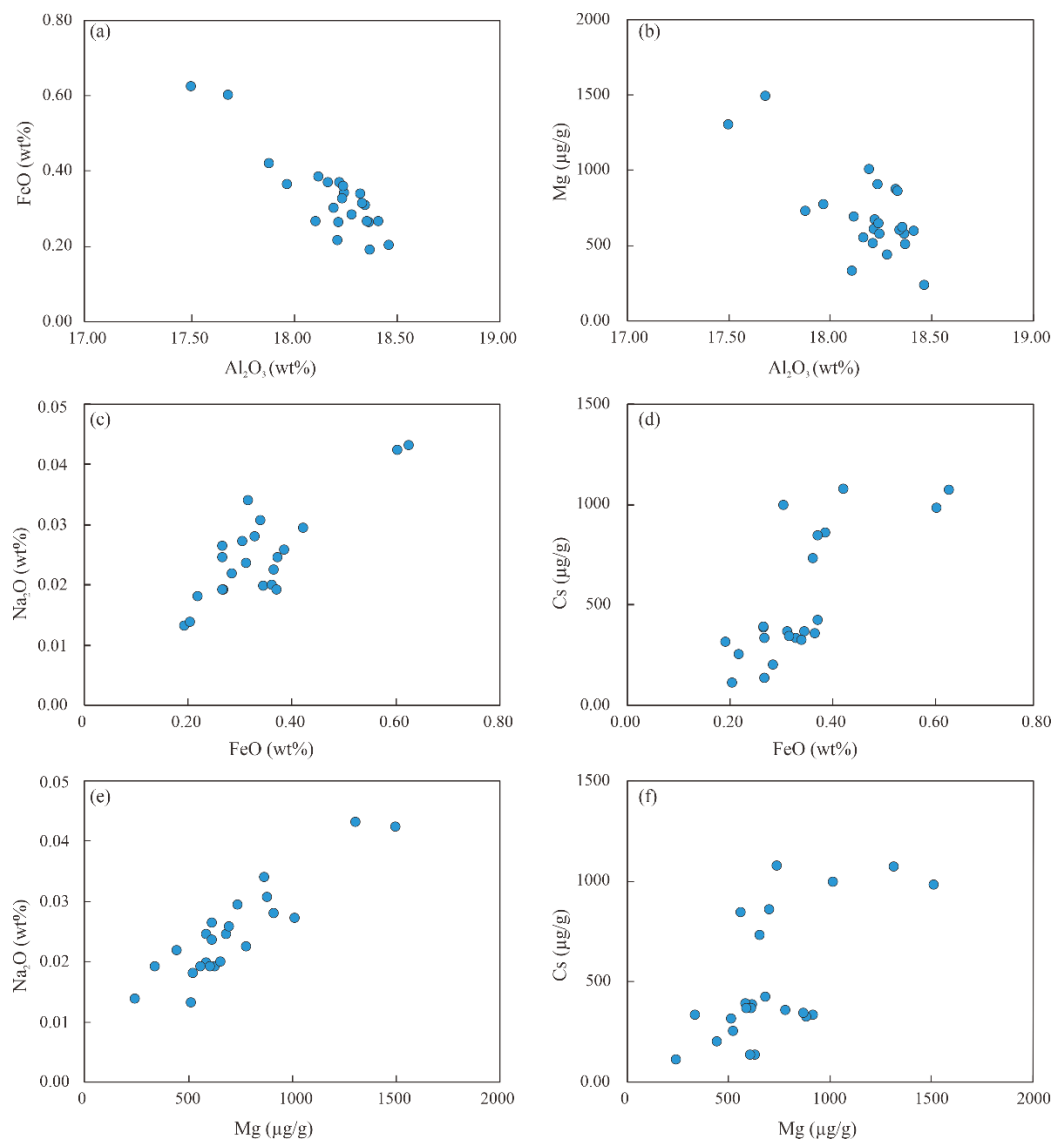


图 5 瑶岗仙石英脉型黑钨矿中绿柱石的元素相关图解

Fig. 5 Element correlation plots of beryl from Yaogangxian quartz vein-type tungsten deposit

5.2 南岭铍资源找矿启示

以 Li、Be、Rb、Cs、Nb、Ta 为代表的稀有金属元素以及 W、Sn 在岩浆结晶分异过程倾向于富集在残余熔体中，常作为共生/伴生矿产资源产出在同一成矿系统中，且与高分异花岗岩密切相关（吴福元等, 2023）。整体来看，铍矿化既可以产出在与高分异花岗质岩浆有关的花岗岩型（如江西宜春 414 Nb-Ta-Li-Be 多金属矿床）和花岗伟晶岩型（如四川甲基

卡 Li-Be 多金属矿床) 稀有金属矿床中, 也可以产出在岩浆热液型 W-Sn 矿床中 (如云南麻花坪 W-Be 矿床、湖南香花岭 Sn-Be 多金属矿床) (李建康等, 2017)。

南岭地区中生代岩浆构造运动复杂, 受古特提斯洋闭合过程远场效应的影响发生陆内造山运动, 随后叠加古太平洋俯冲回撤与陆内伸展作用, 来自不同岩石圈层位的岩浆沿深大断裂侵位, 形成了分异程度不同的酸性岩浆与不同温度域矿种组合的多金属矿床 (图 6a) (王炯辉, 2024)。其中, 以柿竹园、黄沙坪、瑶岗仙为代表的高分异岩浆-热液成矿系统, 在岩体内部或靠近岩体的接触带可发育中高温钨锡 (铋钼铀) 矿化, 包括矽卡岩型、云英岩型和石英脉型; 远离岩体则递次发育中低温热液脉型铅锌金银矿化和浅成低温热液型金银矿化, 共同构成高分异岩浆体系有色稀有金属成矿系统 (王炯辉, 2024; Wang et al., 2025)。

本文新发现的岩浆热液型绿柱石产于瑶岗仙矿床黑钨矿成矿系统深部与高分异花岗岩相关的石英-黑钨矿矿脉中, 且该类型含铍脉体主要对应“五层楼”模式深部的中细脉部位, 围岩为寒武系砂岩地层 (图 6b)。绿柱石主要与石英、云母、毒砂共生, 也可见黑钨矿、辉钼矿、萤石、锡石和黄铜矿, 共同构成 W-Mo-Be±Cu±Sn 成矿金属元素矿物组合。由于与绿柱石共生的黑钨矿、辉钼矿、毒砂均为高温矿物组合, 低温矿物方解石等较少见, 瑶岗仙钨矿床中的铍矿化应属高分异岩体全温度域成矿系统中的高温部分。除石英脉型钨铍矿外, 按照“全位温度域成矿、缺位温度域找矿”的勘查思路, 铍矿化还可能出现在“五层楼”深部的蚀变花岗岩、伟晶岩或云英岩中 (图 6b), 与碳酸盐岩直接接触交代的矽卡岩型矿石中同样可能伴生铍矿化, 矿区深边部具有较大的铍资源找矿空间。

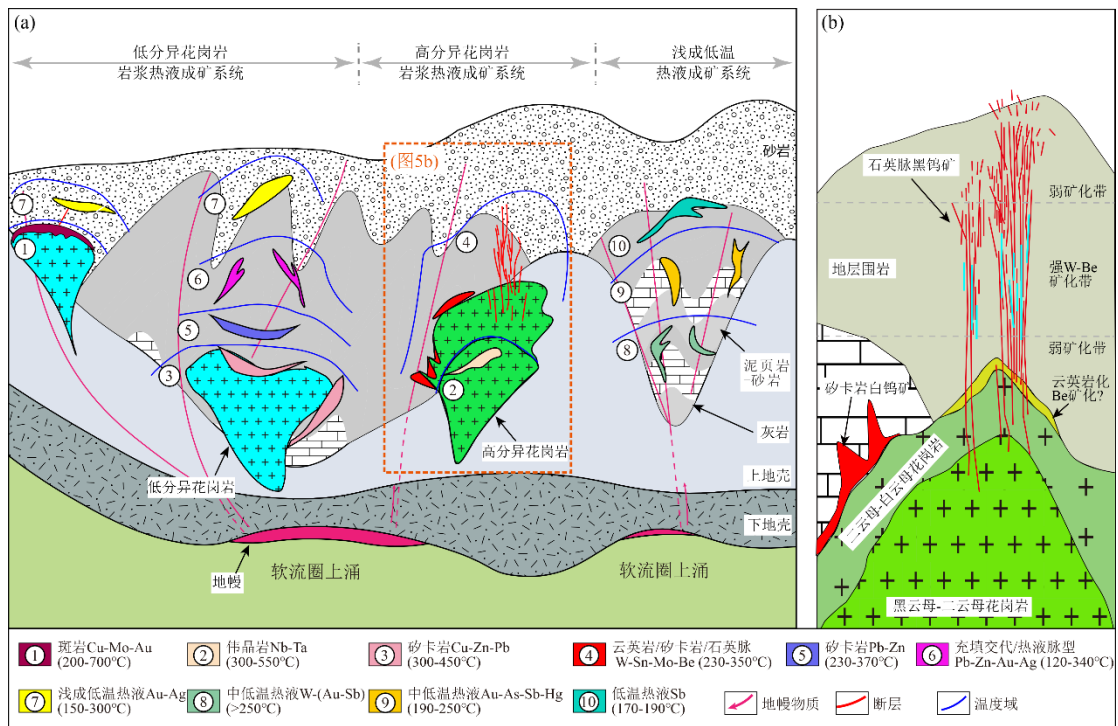


图 6 (a) 南岭全温度域成矿模式图 (据王炯辉, 2024 修改); (b) 瑶岗仙钨铍成矿模式图
Fig. 6 (a) Metallogenetic model of the Nanling region across the full temperature range (modified after Wang, 2024); (b) Metallogenetic model of the Yaogangxian W-Be deposit

值得注意的是,南岭地区除了瑶岗仙钨矿山外,其它地区如江西大吉山钨矿和西华山钨矿等同样广泛发育石英脉型钨矿,其成矿富集过程也多和花岗岩的高程度结晶分异与热液流体演化密切相关,在矿床成因规律上和瑶岗仙石英脉黑钨矿表现出相似性(李晓峰等,2021;侯占得等,2023)。因此,这指南岭区域可能不止存在瑶岗仙一个共伴生铍矿化的钨多金属矿床,整个南岭成矿区带上与脉状黑钨矿密切相关的铍资源具有较大成矿潜力。此外,南岭成矿带内分布着大量和高分异花岗岩密切相关的成矿热液体系(吴福元等,2023;刘贤红等,2025),稀有金属矿化常相互共生/伴生在同一高分异岩浆-热液成矿系统中(Ballouard et al.,2016;Wang et al.,2025)。因此,除石英脉型钨(铍)成矿系统外还可能发育其它稀有金属矿化,如花岗岩型和伟晶岩型锂-铷-铯-铌-钽矿化。但是,当前南岭仍然有许多仅开采钨金属的大型矿山,矿山深部由于钨资源潜力稍低缺少找矿勘探,对共伴生稀有金属的资源评价非常薄弱。未来应当加强以铍为代表的稀有金属综合勘查评价和开发利用,完善南岭高分异岩浆热液系统勘查部署,重点开展石英黑钨矿床深部的“矿中找矿、钨中找铍”工作,为国家紧缺战略性矿产提供短期可以快速利用的资源支撑。

5.3 新类型铍资源的利用评价

需要进一步说明的是,花岗质岩浆等酸性侵入岩在形成和演化过程中,接触围岩为碳酸盐岩地层时通常会反应发生矽卡岩化,并通过接触变质或热液蚀变过程导致Be的富集成矿(Barton and Young,2002;赵一鸣等,2017)。矽卡岩中含铍矿物种类多且化学成分复杂,如湖南香花岭矽卡岩中发育硅铍石、羟硅铍石、香花石、铍石、锂铍石、铁塔菲石、孟宪民石、日光榴石族矿物等,绿柱石少见。目前全球具有工业经济价值的含铍矿物主要是羟硅铍石和绿柱石,而矽卡岩型铍矿中含铍矿物较分散。尽管一些分散在矽卡岩矿床中的铍资源量虽然较大,但是以目前选冶技术还难以从众多含铍矽卡岩矿物中高效分离出独立的含铍矿物羟硅铍石,以类质同象形式赋存铍元素的石榴石族矿物则更难利用,这使得矽卡岩型铍矿的开发利用难度增加。与之相对,与石英脉型钨矿共生的含铍绿柱石的矿物共生关系简单,颗粒较大,选冶过程相对简单。因此,南岭地区除了聚焦以香花岭、柿竹园矿区矽卡岩钨铍多金属成矿系统为代表的铍资源回收攻关,还有更大可能探获石英脉型钨铍矿石。这类之前被忽略的共生矿产资源品位和规模可能较低,但相对简单的回收工艺和共伴生矿种利用技术可能使其更具经济开发价值。因此,笔者建议加强对南岭地区类似瑶岗仙共伴生绿柱石型铍资源的潜力分析和利用评价工作,快速查明可利用的工业资源量并高效实现铍矿的开发利用。

新一轮找矿突破战略行动实施以来,我国在钨锡等稀有金属矿产勘查领域成果丰硕,新类型锂铯等矿种逐步评价利用,铍铌钽等稀缺矿种也逐渐由传统矿集区向新类型、新矿区扩展。作为历经百年开发的瑶岗仙钨矿山,此次共伴生绿柱石铍资源的发现,证实南岭地区高分异花岗岩成矿系统在已有矿山深部仍具有较大找矿潜力。此外,本次瑶岗仙石英脉绿柱石型铍资源的发现与南岭在全国铍地球化学分布图上显示显著的高值异常相吻合(谢学锦等,

2012), 并且我国铍矿的成矿谱系也逐步从传统的阿尔泰、川西、滇西南地区扩展到上扬子周缘、北山及东南沿海地区(饶灿等, 2022b, 2025), 进一步指示区域高分异岩体深部可能发育有成矿类型多样的铍矿化资源。南岭地区作为我国最重要的稀有金属工业基地, 工业体系完善, 交通便利, 在新一轮找矿突破战略行动中针对性开展包括铍在内的稀有金属资源勘查评价和综合开发利用, 既能有效支撑区域铍资源产业的高质量发展, 更为我国可控核聚变、航空航天等战略性新兴产业的发展提供重要资源保障。

6 结论

南岭瑶岗仙钨矿山中首次发现石英脉钨铍共生矿化类型, 含铍矿物是绿柱石, 主要产在脉状黑钨矿“五层楼”模式的中细脉深部位置。绿柱石既可呈脉状的细粒集合体侵入砂岩围岩, 也可形成中粗粒矿物晶体, 并与石英、云母、毒砂、黑钨矿、辉钼矿、黄铜矿及萤石等矿物共生产出, 构成 W-Mo-Be±Cu±Sn 成矿元素组合。绿柱石晶格内 Fe-Mg 与 Al 的负相关性及 Na-Cs 与 Fe-Mg 的正相关性指示 Fe-Mg 与 Na-Cs 对 Al 的耦合替代, 低的碱金属元素含量 (< 0.5 wt.%) 表明其属于无碱绿柱石。矿物共生组合及化学成分指示绿柱石是花岗质岩浆高程度分异演化至中高温热液阶段的产物。本次研究表明南岭成矿带内以石英脉型钨铍矿化为代表的铍成矿潜力大, 找矿前景突出, 未来应加大对铍矿化宏观空间分布规律, 品位变化规模, 矿物共生组合成因联系以及与多类型金属矿种共伴生形成机制的深入研究, 重点开展石英脉钨矿床深部部的“矿中找矿、钨中找铍”工作, 并加强以铍为代表的多种稀有金属综合勘查评价研究和开发利用, 为我国铍资源安全稳定供给发挥重要作用。

致谢: 野外地质调查工作受到湖南瑶岗仙矿业有限责任公司李军、汪林峰等大力支持, 审稿过程中两位审稿专家和编辑部老师对文章提出宝贵的意见, 在此一并表达感谢。本次研究得到五矿勘查开发有限公司科技专项 (No. WKKC-2023YFD01) 资助。

References

- Ballouard, C., Poujol, M., Boulvais, P., et al., 2016. Nb-Ta Fractionation in Peraluminous Granites: A Marker of the Magmatic-Hydrothermal Transition. *Geology*, 44(3): 231-234. <https://doi.org/10.1130/g37475.1>
- Barton, M.D., Young, S., 2002. Non-pegmatitic Deposits of Beryllium: Mineralogy, Geology, Phase Equilibria and Origin. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 50(1): 591-691. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.50.14>
- Černý, P., 2002. Mineralogy of Beryllium in Granitic Pegmatites. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 50(1): 405-444. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.50.10>
- Cerny, P., Anderson, A.J., Tomascak, P.B., et al., 2003. Geochemical and Morphological Features of

- Beryl from the Bikita Granitic Pegmatite, Zimbabwe. *The Canadian Mineralogist*, 41(4): 1003-1011. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.41.4.1003>
- Chen, H., Li, A.B., Zhao, P., et al., 2022. Crystal Chemistry and Fluid Inclusions of Beryl from the Mufushan Area. *South China Geology*, 38(3): 459-471 (in Chinese with English abstract).
- Chen J, Wang R. C., Zhu J. C., et al. 2014. Multiple-Aged Granitoids and Related Tungsten-Tin Mineralization in the Nanling Range, South China. *Science China: Earth Sciences*, 44(1): 111-121 (in Chinese with English abstract).
- Dai, H. Z., Wang, D. H., Liu, L. J., et al., 2019. Metallogenic Age and Metallogenic Model of the He'anping Tungsten-Beryllium Deposit in Zhen'an, Southern Qinling. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1342-1358 (in Chinese with English abstract).
- Dong, S. H., Bi, X. W., Hu, R. Z., et al., 2014. Petrogenesis of the Yaogangxian Composite Granite and Its Relationship with Tungsten Mineralization in Hunan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2749-2765 (in Chinese with English abstract).
- Engell, J., Hansen, J., Jensen, M., et al., 1971. Beryllium Mineralization in the Ilimaussaq Intrusion, South Greenland, with Description of a Field Beryllometer and Chemical Methods. <https://doi.org/10.34194/rapggv.v33.7247>
- Fan, Z.-W., Xiong, Y.-Q., Shao, Y.-J., et al., 2022. Textural and Chemical Characteristics of Beryl from the Baishawo Be-Li-Nb-Ta Pegmatite Deposit, Jiangnan Orogen: Implication for Rare Metal Pegmatite Genesis. *Ore Geology Reviews*, 149: 105094. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105094>
- Foley, N., Hofstra, A., Lindsey, D., et al., 2012. Occurrence Model for Volcanogenic Beryllium Deposits, Scientific Investigations Report, Reston, VA, 52. <https://doi.org/10.3133/sir20105070F>
- Foley, N., Jaskula, B.W., Piatak, N.M., et al., 2017. Beryllium, chap. E of Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, and Bradley, D.C., eds., Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, E1-E32, <https://doi.org/10.3133/pp1802E>
- Hu, R. Z., Gao, W., Fu, S. L., et al., 2024. Mesozoic Intracontinental Mineralization in South China. *Earth Science Frontiers*, 31(1): 226-238 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S. Y., Zhao, K. D., Jiang, H., et al., 2020. Spatiotemporal Distribution, Geological Characteristics and Metallogenic Mechanism of Tungsten and Tin Deposits in China: Progress and Prospect. *Chinese Science Bulletin*, 65(33): 3730-3745 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. M., Zhang, L. K., Jiao, Y. J., et al., 2017. Discovery and Significance of the Cuonadong Superlarge Be-Sn-W Polymetallic Deposit in Himalayan Metallogenic Belt, Tibet. *Mineral Deposits*, 36(4): 6 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. K., Zou, T. R., Wang, D. H., et al., 2017. Metallogenic Regularity of Beryllium Deposits in China. *Mineral Deposits*, 36(4): 951-978 (in Chinese with English abstract).
- Li, P., Li, J. K., Pei, R. F., et al., 2017. Multistage Evolution of the Mufushan Composite Granite

- and Cretaceous Peak of Rare Metal Mineralization: Chronological Evidence. *Earth Science*, 42(10): 1684-1696 (in Chinese with English abstract).
- Liang, F., Zhao, T., Wang, D. H., et al., 2018. Supply and Demand Forecast and Development Strategy of Beryllium Resources in China. *China Mining Magazine*, 27(11): 6-10,17 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. H., Liu, D. L., Lou, Y. L., et al., 2025. Geochronology, Hf Isotope, Geochemistry and Petrogenesis of the Baimashan Composite Pluton in Central Hunan. *Earth Science*, 50(2): 609-620 (in Chinese with English abstract).
- London, D., Evensen, J.M., 2002. Beryllium in Silicic Magmas and the Origin of Beryl-Bearing Pegmatites. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 50(1): 445-486. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.50.11>
- Mao, J. W., Xie, G. Q., Guo, C. L., et al., 2007. Large-scale Tungsten-Tin Polymetallic Mineralization in the Nanling Region: Mineralization Time Limit and Geodynamic Setting. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2329-2338 (in Chinese with English abstract).
- McDonough, W.F., Sun, S.-s., 1995. The Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3-4): 223-253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Ni, P., Pan, J. Y., Han, L., et al., 2023. Spatial-Temporal Distribution, Metallogenic Models and Exploration Directions of Large-scale Granite-related W-Sn Mineralization in South China. *Acta Geologica Sinica*, 97(11): 3497-3534 (in Chinese with English abstract).
- Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., et al., 2011. Iolite: Freeware for the Visualisation and Processing of Mass Spectrometric Data. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(12): 2508-2518. <https://doi.org/10.1039/C1JA10172B>
- Qin, J. H., Wang, C. H., Chen, Y. C., et al., 2022. Mineralogical Characteristics of Beryl and Muscovite from Yiliu Deposit in Central Nanling Region and Their Geological Significance. *Mineral Deposits*, 41(5): 1025-1041 (in Chinese with English abstract).
- Qin, J. H., Wang, D. H., Wang, Y., et al., 2024. Metallogenic Regularity and Prospecting Potential of the Central Nanling Metallogenic Belt. *Geology in China*, 51(4): 1095-1122 (in Chinese with English abstract).
- Rao, C., Wang, R. C., Che, X. D., et al., 2022a. Metallogenic Mechanism and Prospecting Potential of Key Metal Beryllium. *Acta Petrologica Sinica*, 38(7): 1848-1860 (in Chinese with English abstract).
- Rao, C., Wang, R. C., Che, X. D., et al., 2025. Discovery of a New Hydrothermal Beryllium Deposit in the Changshan Area, Northwestern Zhejiang Province. *Geological Bulletin of China*, 44(1): 33-41 (in Chinese with English abstract).
- Rao, C., Wang, R. C., Wu, F. Y., et al., 2022b. A Preliminary Study of the Volcanic-Intrusive Complex-Type Beryllium Metallogenic Belt in the Coastal Area of Southeast China. *Science China Earth Sciences*, 52(8): 1547-1561 (in Chinese with English abstract).
- Rudnick, R.L., Gao, S., 2014. 4.1 - Composition of the Continental Crust, in: Holland, H.D.,

- Turekian, K.K. (Eds.), *Treatise on Geochemistry* (Second Edition). Elsevier, Oxford, 1-51.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>
- Tao, X. Y., Xie, L., Wang, R. C., et al., 2020. Mineralogical Characteristics of Beryl: A Case Study of Beryl from Cuona and Everest Region, Himalaya. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 56(6): 815-829 (in Chinese with English abstract).
- Turner, D., Groat, L.A., Hart, C.J.R., et al., 2007. Mineralogical and Geochemical Study of the True Blue Aquamarine Showing, Southern Yukon. *The Canadian Mineralogist*, 45(2): 203-227.
<https://doi.org/10.2113/gscanmin.45.2.203>
- Uher, P., Chudik, P., Bačík, P., et al., 2012. Beryl Composition and Evolution Trends: An Example from Granitic Pegmatites of the Beryl-Columbite Subtype, Western Carpathians, Slovakia. *Journal of Geosciences*, 55(1): 69-80. <https://doi.org/10.3190/jgeosci.060>
- Wang, D. H., Tang, J. X., Ying, L. J., et al., 2010. Applicability of the "Five Levels + Basement" Prospecting Model and Its Significance for Deep Prospecting. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(4): 733-738 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. H., 2024. Typical Magmatic-Hydrothermal Lead-Zinc Polymetallic Mineralization in the Nanling Metallogenic Belt. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. H., 2025. Characteristics and Prospects of the New Technological Era in the Mining Industry. *China Mining Magazine*, 34(1): 9-16 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Zhang, X., Zhu, Z., et al., 2025. Zirconium Isotope Evidence for Crystal-Melt Segregation During High-Silica Granitic Magma Differentiation. *Earth and Planetary Science Letters*, 655: 119251. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2025.119251>
- Wei, L. M., Tian, H. Y., Yuan, Q., 2018. Research Progress on the "Five Floors" Model of Quartz Vein-Type Tungsten Deposits. *China Tungsten Industry*, 33(5): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Guo, C. L., Hu, F. Y., et al., 2023. Petrogenesis and Metallogeny of Highly Fractionated Granites in the Nanling Region. *Acta Petrologica Sinica*, 39(1): 1-36 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J. H., Gong, M., Li, G. M., et al., 2025. High Heat Production Granites and Lithium Mineralization: A Case Study of the Yifeng-Fengxin Giant Lithium Ore Field in Western Jiangxi. *Earth Science*, 50(7): 2643-2666 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. J., Ren, T. X., Sun, H., 2012. *Geochemical Atlas of China*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Xiong, Y.-Q., Fan, Z.-W., Yu, H.-Y., et al., 2024. Genetic Linkage between Parent Granite and Zoned Rare Metal Pegmatite in the Renli-Chuanziyuan Granite-Pegmatite System, South China. *GSA Bulletin*, 137(3-4): 1607-1627. <https://doi.org/10.1130/B37688.1>
- Xu X., Liang C., Chen J., et al., 2021. Fundamental Geological Features and Metallogenic Geological Backgrounds of Nanling Tectonic Belt. *Earth Science*, 46(4): 1133-1150 (in

Chinese with English abstract).

- Yan, K., Wang, Y., An, P., et al., 2025. Compositional Characteristics and Implications of Beryl from the Mahuaping Be-W Deposit in the Shangri-La Region. *Acta Petrologica Sinica*, 41(6): 2106-2125 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. L., Tang, Z. M., Hu, H., et al., 2022. Quantitative Electron Probe Microanalysis of Be-Bearing Minerals: Constraints from Analytical Conditions. *Acta Petrologica Sinica*, 38(7): 1879-1889 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. M., Feng, C. Y., Li, D. X., et al., 2017. Li- and Be-Bearing Striped Rocks and Related Metasomatites in the Xianghualing Tin-Beryllium Polymetallic Ore Field, Hunan Province. *Mineral Deposits*, 36(6): 1245-1262 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Q. F., Qin, K. Z., Tang, D. M., et al., 2019. Mineralogical Characteristics of Beryl from the Lushi Rare Metal Pegmatite in East Qinling and Their Indicative Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 35(7): 1999-2012 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 陈浩, 李安邦, 赵鹏, 等, 2022. 幕阜山地区绿柱石的晶体化学和流体包裹体特征. *华南地质*, 38(3): 459-471.
- 陈骏, 王汝成, 朱金初, 等, 2014. 南岭多时代花岗岩的钨锡成矿作用. *中国科学: 地球科学*, 44(1): 111-121.
- 代鸿章, 王登红, 刘丽君, 等, 2019. 南秦岭镇安核桃坪钨铍矿床成矿时代及成矿模式探讨. *地质学报*, 93(6): 1342-1358.
- 董少花, 毕献武, 胡瑞忠, 等, 2014. 湖南瑶岗仙复式花岗岩岩石成因及与钨成矿关系. *岩石学报*, 30(9): 2749-2765.
- 胡瑞忠, 高伟, 付山岭, 等, 2024. 华南中生代陆内成矿作用. *地学前缘*, 31(1): 226-238.
- 蒋少涌, 赵葵东, 姜海, 等, 2020. 中国钨锡矿床时空分布规律、地质特征与成矿机制研究进展. *科学通报*, 65(33): 3730-3745.
- 李光明, 张林奎, 焦彦杰, 等, 2017. 西藏喜马拉雅成矿带错那洞超大型铍锡钨多金属矿床的发现及意义. *矿床地质*, 36(4): 6.
- 李建康, 邹天人, 王登红, 等, 2017. 中国铍矿成矿规律. *矿床地质*, 36(4): 951-978.
- 李鹏, 李建康, 裴荣富, 等, 2017. 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. *地球科学*, 42(10): 1684-1696.
- 梁飞, 赵汀, 王登红, 等, 2018. 中国铍资源供需预测与发展战略. *中国矿业*, 27(11): 6-10, 17.
- 刘贤红, 刘德亮, 娄元林, 等, 2025. 湘中白马山复式岩体年代学、Hf 同位素、地球化学及岩石成因. *地球科学*, 50(2): 609-620.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等, 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. *岩石学报*, 23(10): 2329-2338.
- 倪培, 潘君屹, 韩亮, 等, 2023. 华南与花岗岩有关大规模钨锡成矿作用的时空分布、成矿模

- 式及找矿方向. 地质学报, 97(11): 3497-3534.
- 秦锦华, 王成辉, 陈毓川, 等, 2022. 南岭中段一六矿床绿柱石和白云母矿物学特征及其地质意义. 矿床地质, 41(5): 1025-1041.
- 秦锦华, 王登红, 王岩, 等, 2024. 南岭成矿带中段成矿规律与找矿前景分析. 中国地质, 51(4): 1095-1122.
- 饶灿, 王汝成, 车旭东, 等, 2022a. 关键金属铍的成矿机制与找矿前景. 岩石学报, 38(7): 1848-1860.
- 饶灿, 王汝成, 车旭东, 等, 2025. 浙西北常山地区新发现热液型铍矿. 地质通报, 44(1): 33-41.
- 饶灿, 王汝成, 吴福元, 等, 2022b. 中国东南沿海火山-侵入杂岩型铍成矿带初步研究. 中国科学: 地球科学, 52(8): 1547-1561.
- 陶湘媛, 谢磊, 王汝成, 等, 2020. 绿柱石的矿物学特征: 以喜马拉雅错那和珠峰地区绿柱石为例. 南京大学学报(自然科学版), 56(6): 815-829.
- 王登红, 唐菊兴, 应立娟, 等, 2010. “五层楼+地下室”找矿模型的适用性及其对深部找矿的意义. 吉林大学学报(地球科学版), 40(4): 733-738.
- 王炯辉, 2024. 南岭成矿带典型岩浆热液铅锌多金属成矿作用. 北京: 地质出版社.
- 王炯辉, 2025. 矿业新技术时代的特征及展望. 中国矿业, 34(1): 9-16.
- 韦龙明, 田晗钰, 袁琼, 2018. 石英脉型钨矿“五层楼”模式的研究进展. 中国钨业, 33(5): 1-6.
- 吴福元, 郭春丽, 胡方泱, 等, 2023. 南岭高分异花岗岩成岩与成矿. 岩石学报, 39(1): 1-36.
- 吴俊华, 龚敏, 李国猛, 等, 2025. 高产热花岗岩与锂成矿作用: 以赣西地区宜丰-奉新巨型锂矿田为例. 地球科学, 50(7): 2643-2666.
- 谢学锦, 任天祥, 孙焕, 2012. 中国地球化学图集. 北京: 地质出版社.
- 徐先兵, 梁承华, 陈家驹, 等, 2021. 南岭构造带基础地质特征与成矿地质背景. 地球科学, 46(4): 1133-1150.
- 闫阔, 王昱, 安鹏, 等, 2025. 香格里拉地区麻花坪铍钨矿床绿柱石的成分特征及指示意义. 岩石学报, 41(6): 2106-2125.
- 张文兰, 汤志敏, 胡欢, 等, 2022. 含超轻元素 Be 矿物的电子探针定量分析—测试条件的约束. 岩石学报, 38(7): 1879-1889.
- 赵一鸣, 丰成友, 李大新, 等, 2017. 湖南香花岭锡铍多金属矿区的含 Li、Be 条纹岩和有关交代岩. 矿床地质, 36(6): 1245-1262.
- 周起凤, 秦克章, 唐冬梅, 等, 2019. 东秦岭卢氏稀有金属伟晶岩的绿柱石矿物学特征及其指示意义. 岩石学报, 35(7): 1999-2012.

附表 1 绿柱石电子探针和 LA-ICP-MS 元素的分析结果

Appendix table 1 Electron probe microanalysis and LA-ICP-MS elemental composition results for beryl

测点	Y2-01	Y2-02	Y2-03	Y2-04	Y2-05	Y2-06	Y3-01	Y3-02	Y3-03	Y3-04	Y3-05	Y3-06	Y4-01	Y4-02	Y4-03	Y4-04	Y4-05	Y5-01	Y5-02	Y5-03	Y5-04	Y5-05	Y5-06
电子探针 (wt%)																							
CaO	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01
SiO ₂	65.9	66.2	66.5	66.2	66.1	66.2	66.3	66.4	66.4	66.1	65.7	66.5	66.4	66.0	66.5	66.1	66.6	66.1	66.0	65.8	66.1	66.3	66.1
Al ₂ O ₃	18.2	18.4	18.4	18.3	18.2	18.1	18.4	18.2	18.2	18.3	18.0	18.4	18.2	18.1	18.2	17.9	18.5	17.5	17.7	18.2	18.3	18.3	18.2
ZnO	0.01	0.00	0.03	0.03	0.00	0.02	0.06	0.03	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.05	0.00	0.01
CuO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.03	0.00	0.00	0.03	0.01	0.06	0.02	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	0.27	0.27	0.19	0.31	0.22	0.27	0.27	0.37	0.34	0.28	0.37	0.27	0.36	0.39	0.37	0.42	0.20	0.63	0.60	0.33	0.34	0.32	0.30
MnO	0.00	0.02	0.02	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.02
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.02
Na ₂ O	0.27	0.25	0.13	0.24	0.18	0.19	0.19	0.25	0.20	0.22	0.23	0.19	0.20	0.26	0.19	0.29	0.14	0.43	0.42	0.28	0.31	0.34	0.27
MgO	0.12	0.11	0.06	0.10	0.10	0.07	0.09	0.16	0.11	0.12	0.17	0.11	0.12	0.11	0.11	0.14	0.05	0.26	0.23	0.16	0.13	0.19	0.16
K ₂ O	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
LA-ICP-MS (μg/g)																							
Li	337	294	214	353	159	124	179	76.9	80.5	118	92.6	181	121	124	106	127	95.7	131	126	364	284	288	144
Be	52392	51942	51456	52005	52632	52227	53805	53765	52668	53107	52401	52597	54056	52409	52882	51667	51110	49655	48428	49777	49789	50616	50718
Na	2155	2041	1780	2270	1470	1361	1568	1661	1567	1384	2008	1509	1939	1911	1494	1991	920	3313	3987	2528	2469	2517	2267
Mg	611	579	509	607	518	333	624	678	583	439	774	602	650	693	553	731	238	1304	1497	909	878	862	1008
Al	100121	100377	100490	101381	102501	99955	102121	101721	100202	101582	99512	100425	97343	100187	100223	99648	100288	95154	91713	98840	99688	98044	98010
P	286	248	281	204	202	bdl	229	205	341	293	239	bdl	bdl	210	220	166	134	265	226	133	218	209	151
K	155	116	68.9	132	39.5	32.6	117	79.4	83.9	91.4	144	109	97.2	100	63.9	125	56.2	218	102	186	96.0	86.3	160
Ca	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl

测点	Y2-01	Y2-02	Y2-03	Y2-04	Y2-05	Y2-06	Y3-01	Y3-02	Y3-03	Y3-04	Y3-05	Y3-06	Y4-01	Y4-02	Y4-03	Y4-04	Y4-05	Y5-01	Y5-02	Y5-03	Y5-04	Y5-05	Y5-06
Sc	11.6	8.66	6.05	6.82	1.61	9.10	6.12	22.5	28.1	27.8	21.0	3.03	8.79	16.9	13.1	25.2	10.1	81.4	91.6	6.98	10.2	9.29	75.2
Ti	30.8	37.0	23.6	24.5	28.6	29.4	32.8	30.4	27.6	23.7	43.1	24.9	68.9	31.0	40.2	55.0	23.7	284	470	28.1	28.8	32.5	58.1
V	58.2	57.1	44.0	64.2	13.5	29.1	137	227	209	318	234	136	51.9	72.1	42.3	84.7	58.1	234	262	129	142	159	232
Cr	10.9	6.75	bdl	7.10	bdl	bdl	11.2	bdl	14.8	bdl	bdl	15.4	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	3.24	bdl	bdl	bdl	7.44
Mn	34.9	30.5	21.0	32.2	17.7	14.5	19.5	27.0	23.2	19.0	29.7	18.2	38.2	41.1	20.8	42.8	9.72	70.6	80.3	32.4	31.3	31.4	42.9
Fe	2254	2237	1934	2275	1710	1905	1932	2350	2161	2067	2927	1855	2782	2762	1922	2992	1449	4713	5192	2543	2543	2404	3240
Co	bdl	bdl	bdl	0.83	bdl	bdl	bdl	bdl	1.00	bdl	bdl	1.22	bdl	bdl	bdl	0.82	bdl	bdl	bdl	1.45	1.05	1.22	bdl
Zn	152	154	129	178	86.9	73.8	135	37.1	43.1	114	52.2	123	35.6	43.6	46.9	41.3	55.9	42.1	51.5	188	172	165	55.8
Ga	15.7	17.6	15.6	14.9	12.4	19.8	19.6	27.2	26.5	28.2	29.9	19.8	24.2	23.8	14.8	30.0	21.5	26.1	26.1	16.1	16.0	15.3	25.3
Rb	44.5	37.1	22.6	39.1	16.4	12.4	34.2	50.9	35.1	29.9	48.0	33.2	38.6	44.7	20.9	48.5	15.7	85.6	67.0	47.5	39.7	34.0	57.7
Sr	bdl	bdl	0.36	bdl	bdl	0.28	bdl	bdl	bdl	bdl	0.13	bdl	bdl	bdl	0.20	bdl	bdl	bdl	0.08	bdl	0.58	0.50	bdl
Cs	390	393	315	368	255	337	138	424	368	205	361	138	731	859	845	1078	115	1073	986	335	327	345	998

注：bdl-低于检测限。