

文章编号: 1004-4051(2025)07-0008-10

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20250374

我国高纯石英资源勘查开发现状及思考

张亮^{1,2,3}, 朱黎宽^{1,2,3}, 李建国^{1,2,3}, 谭秀民^{1,2,3}, 万会⁴, 庞大卫^{1,2,3}

1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006;
2. 国家非金属矿资源综合利用工程技术研究中心, 河南 郑州 450006;
3. 自然资源部高纯石英资源开发利用工程技术创新中心, 河南 郑州 450006;
4. 自然资源部矿产资源储量评审中心, 北京 100035)

摘要: 高纯石英资源是一种重要的关键非金属资源和战略新兴产业的关键基础材料, 在光伏、半导体、光纤等领域应用广泛, 需求旺盛。我国是全球最大的高纯石英消费国, 但我国高纯石英资源稀缺, 原料矿石对外总体依存度高, 亟需通过国内资源地质找矿和勘查工作, 保障资源安全供给。我国高纯石英资源找矿勘查工作起步相对较晚, 且地质勘查评价工作仍需不断完善。通过系统总结近年来我国高纯石英资源地质找矿和勘查开发现状, 结合国内高纯石英供需情况和加工技术特点分析得出: ①国内高纯石英资源地质找矿取得系列进展, 目前找矿突破的主要资源类型为花岗伟晶岩型和脉石英型, 伟晶岩型资源主要分布在新疆阿尔泰、河南东秦岭等地区, 脉石英型资源主要分布在陕西、安徽、四川、山东等地区, 稳定的高品质资源有望实现突破。②国内高纯石英选矿提纯加工技术发展快, 企业已形成了较为成熟的提纯加工和材料制备技术, 但能够规模化稳定生产高品质石英砂的企业相对较少, 选矿提纯加工技术在地质勘查阶段应用评价较少。③制约高纯石英资源找矿勘查技术问题包括: 高效野外快速识别技术和适用勘查方法组合缺乏, 找矿勘查效率低; 合理的一般矿床工业指标体系仍未建立, 制约资源量估算和矿体圈定; 地质勘查过程中合理开展选冶提纯试验和技术经济评价工作困难; 地质勘查无标准可依, 严重制约地质勘查和矿政管理工作。针对高纯石英资源特点和找矿勘查存在问题, 从高效勘查方法研发、矿床一般工业指标制定、选矿提纯加工技术研发、地质勘查规范编制等方面提出相应对策建议, 以期进一步提升我国高纯石英资源勘查工作质量。

关键词: 高纯石英; 市场现状; 地质勘查; 工业指标; 勘查技术

中图分类号: TD-9; P621 **文献标识码:** A

The situation and thoughts on the exploration and development of high-purity quartz resources in China

ZHANG Liang^{1,2,3}, ZHU Likuan^{1,2,3}, LI Jianguo^{1,2,3}, TAN Xiumin^{1,2,3},
WAN Hui⁴, PANG Dawei^{1,2,3}

1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Zhengzhou 450006, China;
2. China National Engineering Research Center for Utilization of Industrial Minerals, Zhengzhou 450006, China;

收稿日期: 2025-03-04 责任编辑: 刘硕

基金项目: 国家重点研发计划项目“高纯石英原料矿床成矿机制与提纯关键技术”资助(编号: 2024YFC2910100, 2024YFC2910103); 中国地质调查局地质调查项目资助(编号: DD20250208804)

第一作者简介: 张亮(1987—), 男, 汉族, 山东潍坊人, 硕士, 副研究员, 主要从事矿床地质及矿产经济研究, E-mail: geozhangliang@163.com。

通讯作者简介: 朱黎宽(1984—), 男, 汉族, 河南南阳人, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿产地质调查和矿床学研究, E-mail: zhulikuan@163.com。

引用格式: 张亮, 朱黎宽, 李建国, 等. 我国高纯石英资源勘查开发现状及思考[J]. 中国矿业, 2025, 34(7): 8-17.

ZHANG Liang, ZHU Likuan, LI Jianguo, et al. The situation and thoughts on the exploration and development of high-purity quartz resources in China[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(7): 8-17.

3. China Engineering Technology Innovation Center for Development and Utilization of High Purity Quartz, Ministry of Natural Resources, Zhengzhou 450006, China;

4. Mineral Resources and Reserves Evaluation Center of MNR, Beijing 100035, China)

Abstract: High-purity quartz(HPQ) is an important critical mineral resource and key foundational materials for strategic emerging industries. It is widely used in high-tech fields such as photovoltaic, semiconductor, fiber optic communications, optics etc. China is the largest consumer of HPQ in the world, however, the HPQ resources are scarce, and the foreign dependence of material ore is high. It is necessary to ensure the supply of HPQ resources by prospecting for domestic resources. As the prospecting and exploration work of HPQ material started relatively late in China, a lot of work still needs to be done. This paper systematically summarizes the geological prospecting and exploration situation in recent years, and analyzes the supply and demand of HPQ and the characteristics of processing technology, the study shows: ① a series of prospecting achievements have been made in HPQ resources in China. The main types of HPQ resources newly discovered are granitic-pegmatite type and hydrothermal vein quartz. The pegmatitic type resources are mainly distributed in Altai and East Qinling, while the hydrothermal vein quartz type resources are mainly distributed in Shaanxi, Anhui, Sichuan, Shandong, etc. Based on the achievements, stable high-quality resources are expected to breakthrough. ② Although the processing technology has developed rapidly and some enterprises have formed mature beneficiation and purification technology, there are few enterprises can steadily produce high-quality HPQ on a large scale and few beneficiation and purification evaluations which are applied to geological exploration. ③ The problems restricting the exploration of HPQ include: the efficient field rapid identification technology and applicable combination of exploration methods is lacking, which lead the prospecting efficiency is low; the reasonable industrial index system of HPQ ore deposit has not been established, which restricts the estimation of resources and the delineation of ore bodies; it is difficult to carry out beneficiation and purification test in geological exploration, which lead the technical and economic evaluation difficult; there is no standard for HPQ geological exploration, which seriously restricts the exploration work. Based on the characteristics of HPQ resources and the existing problems in exploration, this paper puts forward suggestions from the aspects of research and development of efficient exploration methods, establishment of industrial indexes, research on technology of mineral processing and purification, and formulation of HPQ material exploration specifications, expecting further improvement for the quality of HPQ material exploration in China.

Keywords: high-purity quartz; market situation; geological exploration; industrial index; exploration technology

0 引言

高纯石英是指经加工后石英中 SiO_2 含量达到 99.99%(4N), 杂质元素、包裹体含量、粒度等达到光伏、半导体、光纤、光学、电光源等领域要求的石英产品^[1-2], 可以加工高纯石英的矿产资源称为高纯石英资源。高纯石英具有耐高温、纯度高、化学稳定性高、透光率高、热膨胀系数低等优异的物理化学特性, 可以用于制作光伏级坩埚、半导体级坩埚、光纤、超高功率光源玻璃、航空玻璃等高新技术产品, 是新一代信息技术产业、新能源产业、新材料产业等战略性新兴产业必不可缺的关键基础材料^[3]。由于企业对矿床地质资料和加工技术保密等原因, 加之以往高纯石英在我国并不是独立矿种, 高纯石英市场情况、勘查开发情况一直缺乏系统总结。近年来, 随着战略性新兴产业快速发展, 国家和行业对高

纯石英资源等战略性资源保障问题越来越重视^[4-6], 目前高纯石英矿也已正式列为我国第 174 个矿种。本文系统总结全球及我国高纯石英资源市场供需现状及趋势、资源保障情况、勘查开发现状等, 分析了目前制约我国高纯石英资源找矿和勘查的主要问题, 提出我国高纯石英地质勘查高质量发展的对策建议, 以期进一步提升高纯石英资源勘查工作质量, 保障我国高纯石英资源供给安全。

1 市场供需及资源保障

1.1 市场供需

随着战略性新兴产业尤其是光伏产业的快速发展, 高纯石英需求快速增长。2023 年, 全球高纯石英砂需求量为 27 万~30 万 t, 较 2019 年 15 万 t 增长了 80%, 主要用于光伏、半导体、电光源、光纤、光学等五大领域。在高纯石英各个消费领域中, 光伏领域

用量占比约 52.81%、半导体领域用量占比约 20.59%、电光源领域用量占比约 12.22%、光纤领域用量占比约 5.56%、光学领域用量占比约 4.63%，其他领域用

量占比约 4.19%，光伏和半导体领域用量超过 70%（图 1）。全球高纯石英砂消费主要集中在 中国、德国、日本、美国等国家（图 1）。

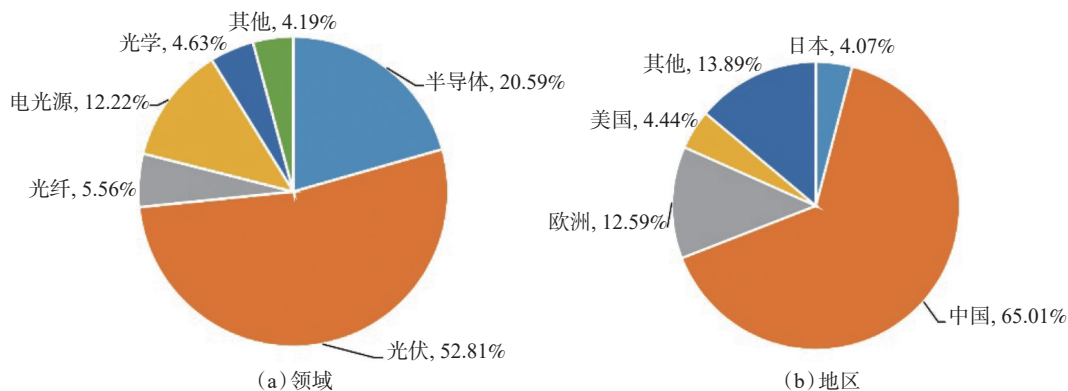


图 1 2023 年全球高纯石英不同应用领域及不同地区消费现状

Fig. 1 Global consumption of HPQ in different application areas and different regions in 2023

我国是目前全球高纯石英最大消费国，近年来随着我国光伏产业飞速发展，高纯石英需求量迅速提升（图 2），约占全球总需求量的 65.01%（图 1），近五年我国新增需求量占全球同期新增量的 90% 以上。我国高纯石英砂主要用于光伏（约占 62.07%）和电光源领域（约占 16.33%）的拉管、打砵、坩埚等产品制备。随着“双碳”目标实施，光伏产业仍将是我国高纯石英消费增长的最大驱动力。根据《2023 中国与世界光伏发展白皮书》规划，到 2030 年，中国太阳能光伏累计装机量将达到 1 200 GW，而 2023 年仅为 609 GW，与预期目标还有较大差距。目前国内领先的硅片制造企业纷纷布局新建产能，单晶硅片产能增加将会极大带动高纯石英坩埚、石英管、石英砵等配套消耗产品的需求。此外，半导体、光学新材料等领域也将继续保持较快增长，电光源、光纤等领域需求稳定。根据测算，到 2030 年我国高纯石英砂年

需求将超过 25 万 t，产值超过 142 亿元。

1.2 资源保障

全球高纯石英资源分布不均，主要分布在美国、印度、巴西、俄罗斯、安哥拉、巴基斯坦等国家，主要矿床类型为花岗伟晶岩型、脉石英型和水晶等^[7-8]。花岗伟晶岩型高纯石英原料矿石主要产自美国（约 90%）和印度（约 10%），脉石英型高纯石英原料矿石主要产自印度、安哥拉、俄罗斯、巴西、巴基斯坦等国家，目前全球高纯石英坩埚内层砂（年消耗约 4 万 t）几乎 100% 来自美国 Spruce Pine 花岗伟晶岩型矿床，主要由美国矽比科（Sibelco）、挪威天阔石（TQC）两家公司开发，两家公司只对外出售高纯石英砂，并不出售矿石。我国高纯石英资源稀缺，原料矿石对外依存度高（图 2）。光伏、半导体级石英坩埚用内层砂几乎全部来自美国 Spruce Pine 花岗伟晶岩型矿床^[4]。除直接购买美国矽比科（Sibelco）、挪威天阔石（TQC）两家企业的成品砂外，国内企业多采用进口国外原料矿石满足生产需要，主要进口自印度、安哥拉、巴西等国家的脉石英。国内已发现并开发利用的高纯石英矿石类型主要为脉石英，主要分布在湖北、安徽、四川、甘肃、陕西等地，这些矿石主要被用于制备小尺寸石英管、硅微粉初级材料等中低端制品。根据本文统计，尽管目前我国高纯石英砂的年总产值仅为 100 亿元左右，但由于高纯石英玻璃制品辐射到下游的光伏、半导体、新能源汽车、通讯、航空天等高精尖产业，尤其是半导体光伏产业多晶硅加工单晶硅过程中，需要用到石英坩埚、石英管、石英砵等高纯石英制品，且目前暂无可替代材料，因此，高纯石英直接影响了下游万亿级的光伏产业和

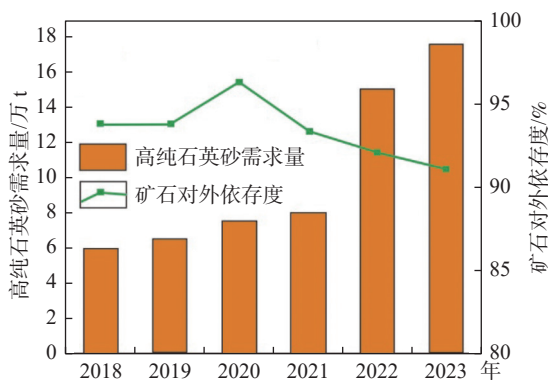


图 2 2018—2023 年中国高纯石英消费需求量及对外依存度

Fig. 2 Consumption and external dependence of HPQ in China from 2018 to 2023

半导体产业, 已成为制约产业链安全的“卡脖子”关键原材料, 高纯石英资源安全保障意义重大。

2 勘查开发现状

2.1 成矿机理研究现状

高纯石英矿床形成机制复杂, 部分学者^[7,9-11]结合典型矿床针对高纯石英的杂质类型、评价方法、成矿机理等进行了系统的概述; 还有学者^[12-19]在此基础上进行了进一步研究和总结, 见表 1。前人研究表明, 石英中 Al、Ti、Li、Na、K、Fe、Ge, 以及包裹体等杂质含量受初始岩浆性质、石英结晶物理化学条件、流体成分及演化等因素影响, 此外后期的变质作用会使石英发生脆性破裂、塑性变形、物质扩散迁移等现象, 导致部分微量元素和包裹体从晶体中释放, 可能会对伟晶岩型石英中包裹体和杂质元素起到一定的“净化”作用。石英矿物中关键杂质元素 Al、Ti 含量(通常要求 Al < 50 μg/g, Ti < 10 μg/g), 决定了 400~600 °C 的成岩温度可能更有利于高纯石英矿物形成; 在充分结晶后, 经历后期适当的变质作用(通常绿片岩相-低角闪岩相)更有利于高纯石英矿物的形成; 通常不含暗色矿物的伟晶状花岗岩-花岗伟晶岩早期阶段结晶形成的石英矿物, 以及变质热液

形成脉石英, 可能更有利于高纯石英矿物原料形成^[1,16,18-19]。如美国 Spruce Pine 矿床为古生代(404~377 Ma)阿巴拉契亚造山运动中 Acadian 构造-岩浆活动侵位形成的花岗质岩浆经结晶分异形成的花岗伟晶岩, 在遭受后期绿片岩相变质作用影响, 使石英发生重结晶和塑性变形形成。区内含高纯石英的矿体主要产出于与花岗闪长岩紧密共生的花岗伟晶岩脉体, 而非前人认为的白岗岩岩体, 矿石颜色为灰白色, 主要矿物组成为石英、钠长石、微斜长石和白云母, 矿石中石英矿物无色透明至半透明并遭受了一定的构造破碎和变质变形(图 3)。伴生矿物偶见极少量的黑云母、石榴子石、磷灰石等, 锂辉石、独居石、电气石、萤石等含挥发分及稀有金属矿物几乎未出现^[1,20-22], 矿石经加工提纯后可以满足半导体级石英坩埚、光伏级石英坩埚等高端高纯石英砂要求^[9]。

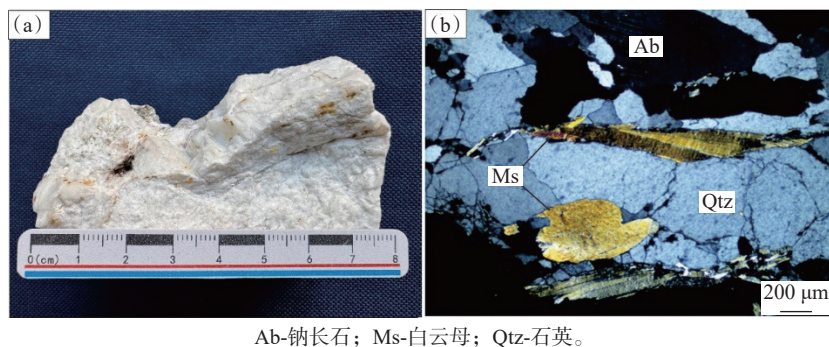
2.2 找矿勘查与加工技术现状

2.2.1 找矿勘查

国外针对高纯石英地质勘查主要由高纯石英生产加工企业组织开展, 美国矽比科(Sibelco)等企业将高纯石英资源视为垄断性资源, 因此, 已开发的高纯石英矿床勘查资料并未公开报道。我国高纯石英资

表 1 全球典型高纯石英矿床类型、地质特征、产品用途

Table 1 Typical types, geological characteristics, and product applications of high-purity quartz deposits worldwide					
序号	国家	矿床名称	矿床类型	地质特征	产品用途
1	美国	Spruce Pine 矿床	花岗伟晶岩	矿床矿体为花岗伟晶岩, 遭受了后期绿片岩相变质作用影响。伟晶岩整体沿北东-南西构造线展布, 伟晶岩脉长为一到十几千米不等, 宽为几百米到十几千米不等, 在白岗岩岩体和花岗闪长岩体中均有出露。石英中流体包裹体非常少见, 大小为 1~20 μm, 偶尔可见少量矿物包裹体, 矿物包裹体主要为白云母、长石等	全球最优质的高纯石英原料, 用于制作光伏半导体石英坩埚、拉管、打坨等产品
2	挪威	Nedre Øedred 矿床	花岗伟晶岩	矿床位于跨斯堪纳维亚岩浆岩带的 Drag 伟晶岩聚集区中, 矿床与经变质变形作用改造的 NYF 型伟晶岩有关。矿体为雪茄状的石英核, 核部的石英晶体纯净, 粒径平均 6 mm, 含少量矿物包裹体, 主要的矿物包裹体包括黑云母、钠长石、钾长石、熔体包裹体和方解石, 颗粒大小在 5~200 μm 之间	用于拉管、光学领域
3	俄罗斯	Kyshtym 矿床	脉石英	矿床赋存在 Ufalei 变质复合岩体中, 石英晶体纯净, 矿物和流体包裹体含量少, 脉石矿物主要有长石、云母、锆石、独居石等。矿床为变质过程中形成的变质热液脉石英, 在经历后期叠加变质作用后, 使石英发生重结晶, 原有石英晶体中杂质元素含量的降低形成	用于照明、光伏、半导体等领域石英坩埚、拉管、打坨制备
4	印度	Garuda 矿床	脉石英	产地地质背景不明; 矿石手标本石英晶粒呈鱼籽状聚集, 石英颗粒呈烟灰色, 透明-半透明, 镜下观察石英颗粒表面干净, 呈现波状消光, 脉体形成后遭受了后期变质作用, 粒度为 0.4~4 mm, 石英矿物中包裹体含量少	用于光伏领域石英坩埚中外层、拉管制备
5	澳大利亚	Lighthouse 矿床	脉石英	矿体上盘围岩为元古宙艾恩斯利变质岩系的黑云母片麻岩、白云母片岩; 下盘围岩为风化状的志留纪-泥盆纪中细粒花岗闪长岩。矿石中石英颗粒纯净、半透明或乳白色、块状, 近直立状充填于逆断层中	用于坩埚外层、拉管原料制备
6	中国	阿尔泰地区矿床	花岗伟晶岩	矿床矿体为花岗伟晶岩, 多数呈北西向展布, 脉体规模宽 2~140 m、长 100~2 km 不等。矿石矿物组成主要为钠长石、条纹长石、微斜长石、石英、白云母, 含极少量石榴子石、黑云母等, 石英晶体纯净, 呈无色透明, 他形粒状, 镜下观察石英粒度总体介于 0.3~4 mm 之间, 并呈波状消光	经选矿提纯试验后纯度达到 4N8, 关键杂质元素 Al < 14 μg/g, Ti < 4 μg/g, Ca < 2 μg/g, K < 1 μg/g, Na < 1 μg/g, Li < 1 μg/g, 达到坩埚砂要求



Ab-钠长石; Ms-白云母; Qtz-石英。

图 3 美国 Spruce Pine 矿床矿石手标本及显微镜下特征

Fig. 3 Hand specimens and microscopic characteristics of ore from the Spruce Pine deposit in the United States

源地质找矿起步较晚,虽然在花岗伟晶岩型资源和脉石英型资源地质找矿方面取得系列重要进展,但仍未实现规模化开发利用。早期找矿工作大致从 2010 年开始,主要由石英企业自发开展,主要依据实际生产经验,通过石英颗粒颜色、透明度、矿物结构构造,以及显微镜下特征等判断。2016 年开始,中国地质调查局陆续部署了高纯石英地质调查项目;2019 年之后,中国地质调查局、中国建材集团有限公司、河南省、江西省、新疆维吾尔自治区等单位 and 地区相继组织开展了高纯石英资源找矿工作。

目前高纯石英找矿勘查相继在花岗伟晶岩型和脉石英型取得了一系列发现和认识。在花岗伟晶岩型高纯石英调查方面:①中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所先后在新疆阿尔泰、河南东秦岭等地区新发现高纯石英潜力资源多处,并开展了部分样品的材料制备评价工作,取得较好进展^[23-24],提出新疆阿尔泰地区、河南东秦岭地区是我国高纯石英重要潜在资源基地,目前正在开展相关研究工作;②江西省地质调查勘查院在江西省宁都地区调查发现了白云母花岗岩伟晶型高纯石英潜力资源^[25],提出西武夷山地区是花岗岩型高纯石英用硅质原料的重要成矿区带,具有较大找矿潜力^[26];③河南省豫地集团、河南省地质科学研究院在河南东秦岭区域开展了高纯石英调查评价工作,发现花岗伟晶岩型及白岗岩型高纯石英潜力资源多处^[27-28]。

在脉石英型高纯石英调查方面:①中国建筑材料工业地质勘查中心在安徽、陕西等地发现多处脉石英资源,总结变质热液形成的脉石英可能更有利于脉石英型高纯石英资源形成^[29-31];②中国地质科学院矿产资源研究所等单位在山东、河北等地也发现脉石英型高纯石英潜力资源;③高纯石英生产企业在高纯石英找矿和开发利用方面也取得了一定的进展,如四川、山西、新疆、湖北等地发现了从石英玻璃管到坩埚外层料等级不等的高纯石英原料,但多

数为小规模“鸡窝矿”,主要用于中低端石英玻璃管原料。

2.2.2 加工技术

美国矽比科(Sibelco)、挪威天阔石(TQC)等公司对各自加工技术严格垄断封锁,对外仅出售成品砂,仅可知原则性工艺流程,企业具体生产工艺和参数无法被国内企业获取和借鉴。相较国外,我国高纯石英生产企业的提纯加工技术起步晚、发展快,已形成了较为成熟的提纯加工和材料制备技术,国内高纯石英生产技术工艺主要适用于脉石英,针对花岗伟晶岩型等资源禀赋特征的提纯加工工艺研究相对较少。根据本文统计,国内能够生产高纯石英的企业超过 50 家,但由于企业间生产加工技术保密,且所用矿石原料多来自国外不同国家和地区,能够规模化稳定生产高品质的石英砂产品仅有江苏太平洋石英股份有限公司、连云港福东正佑照明电器有限公司等几家龙头企业,多数企业仍以生产拉管砂、坩埚中外层砂等中低端产品为主。近年来,国内以中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所、武汉理工大学、成都理工大学等为代表的一批科研院所和高校,积极推动以国内花岗伟晶岩、脉石英等不同类型资源为对象的高纯石英加工提纯研究工作,并取得了较好的进展。如:①中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所自主研发了钙等杂质元素定向去除技术,利用新疆阿尔泰地区花岗伟晶岩型高纯石英样品,采用“磨矿制砂-重选-磁选-浮选-混合酸浸-煅烧水淬-混合酸浸”的工艺流程,得到石英砂纯度达为 4N83 级产品^[24],石英砂中 Al、Ti、Li、Na、K、Ca 等关键杂质元素指标较好,利用已发现的国内资源开展了坩埚制备试验评价,相关指标达到了《单晶硅生长用石英坩埚》(JC/T 1048—2018)中内层要求;②武汉理工大学开展了相应理论研究利用江西某脉石英资源,采用“4 段磁选-2 段擦洗-2 段水洗-2 段浮选-2 段脱药-焙烧-水淬-酸浸”工艺,得到石英砂纯度为

4N5级的产品^[32-33]。

3 找矿勘查面临主要问题

高纯石英资源是重要的战略性资源,对于国家战略性新兴产业健康发展具有重要意义,国家和行业高度重视国内高纯石英资源找矿和资源保障工作^[5,34-37]。由于高纯石英对矿体的稳定性、矿体规模,以及原料矿石中杂质元素含量、包裹体特征、粒度、羟基含量、结晶特性等技术要求特殊,勘查评价方法和内容明显区别于常规硅质原料和其他矿种,加之国内外企业对高纯石英矿床地点、实物样品、相关地质勘查资料普遍保密,缺少从“典型矿床-矿石-成品砂”的系列研究对象,导致在高纯石英原料矿床地质找矿和勘查过程中在野外识别标志、勘查方法、工业指标等方面存在一系列亟需解决的问题,严重制约我国高纯石英资源的勘查开发和矿政管理工作。

3.1 野外快速识别标志不明

高纯石英由于其用途的特殊性和对原料矿石要求的苛刻性,往往需要综合地质、选矿、冶金、检测、材料评价等多学科协同合作才能确定找到资源的可利用性^[7]。目前可以加工高纯石英的岩石类型主要包括花岗伟晶岩、脉石英、水晶等^[1,19,22,38],其中,花岗伟晶岩和脉石英在我国分布广泛,数量庞大^[38-39],在实际找矿勘查工作中,对所有发现的岩石样品开展选冶提纯实验、高精度化学分析,以及材料评价工作是不现实的,因此,需要在早期找矿勘查阶段通过野外快速识别标志和技术筛选绝大部分不合格样品,筛选出高纯石英潜力原料,以降低后续投入,提高找矿效率。目前可以加工高纯石英的原料矿石产出稀少、深入的矿床和实物样品研究欠缺,典型矿床和矿石解剖研究相对缺乏,导致高纯石英资源成矿机理、主要控矿要素、野外产出情况、矿石手标本特征、石英及共伴生矿物特征等研究较浅,加之高纯石英对原料中杂质精度要求高(通常为ppm级别)、影响要素多(如杂质、包裹体、粒度、羟基等)、影响产品品质微观特征宏观表现不明显等原因,目前高纯石英地质找矿过程中,高纯石英原料矿石野外快速识别判别标志不明,仍多依赖工作经验如石英的颜色、透明度等定性判断石英矿物可加工高纯石英的潜力,导致在实际工作中大量不合格伟晶岩、脉石英等被用作选冶评价试验,高纯石英资源找矿效率低下。

3.2 缺乏适用的勘查方法组合

通常地质勘查方法有遥感、重力、电法、磁法、地震、槽探、钻探等手段^[40-42],在花岗伟晶岩型稀有金属矿、脉石英等脉状矿体的勘查找矿过程中,可以参照常规硅质原料及脉状矿体圈定方法,利用矿体与

周围岩石在密度、弹性模量、导电性能等物理性质上存在的差异,识别和圈定脉状岩体和隐伏岩体,如:利用高密度电法和音频大地电磁测深法(AMT)在我国甲基卡、马尔康、白龙山等伟晶岩型锂矿床的探测中取得了显著效果^[43]。国内已发现的高纯石英矿体主要分布在古老变质岩(如片麻岩、斜长角闪岩、片岩等)中,形态上多呈脉状、透镜状、不规则状等,通常由多条矿脉组成,花岗伟晶岩还具有分带性特征^[21,39,44-45],不同成岩阶段、不同成岩位置对于高纯石英资源的形成也有一定影响。因此,对于某一地区伟晶岩或脉石英型潜力原料而言,并不是该区发现的所有脉体或者脉体所有部位都可以加工成为高纯石英^[1,23]。虽然利用遥感解译、电法、磁法等方法可以在一定程度上实现脉状矿体大尺度识别和岩体轮廓的圈定,但对于高纯石英矿体的边界、矿体连续性、品质、形态等特征识别和控制而言,单独的遥感、重力、电法、磁法等方法在高纯石英勘查过程中的有效性较差,制约高纯石英资源矿体圈定和规模控制,亟需研发更为有效的方法和手段组合,支撑地质勘查工作。

3.3 一般矿床工业指标未制定

一般矿床工业指标是矿体圈定和资源量估算的重要基础依据。现有的石英资源一般矿床工业指标主要针对硅质原料类,矿石质量通常结合石英矿物资源的不同用途(如玻璃用、陶瓷用、冶金用、铸型用等),对矿石中的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 P_2O_5 、 TiO_2 、 Na_2O 、 K_2O 等成分含量有一定技术要求,数量级通常为百分含量,开采指标主要结合相关用途矿体价值对可采厚度、夹石剔除厚度等进行规定^[8,46]。

与传统硅质原料特点相较,高纯石英在资源价值和技术等级与常规的石英资源明显不同:在资源价值方面,高纯石英资源主要用于光伏、半导体、光学、电光源等新兴领域,其矿石价格通常 >2000 元/t原矿石,远高于传统硅质原料几十到几百元/t原矿石,高附加值决定了高纯石英资源的开采指标和矿石质量指标明显区别于常规硅质原料;在技术等级方面,不同用途高纯石英资源其技术要求各不相同,高纯石英对杂质要求通常是ppm级别,决定矿石质量的因素除杂质含量外,还包括包裹体、羟基等多个要素,因此,其矿石质量指标与常规硅质原料完全不同。由于以往高纯石英矿并不是单独的矿种,目前我国还没有专门针对高纯石英资源制定相应一般矿床工业指标,以往硅质原料要求显然不合适高纯石英资源价值高、技术要求高的实际特点,导致目前地质勘查过程中,找到高纯石英资源矿体圈定困难、资源量

估算无依据、按照常规惯例圈定的资源量无法认定的窘迫现状,严重制约高纯石英资源的资源储量估算和开发利用。

3.4 技术经济评价工作困难

通常未加酸浸、氯化、材料评价等流程的常规选矿试验并不能确定高纯石英矿石最终可加工性,试验前详细的工艺矿物学研究和高质量的矿石加工选冶试验在高纯石英各勘查阶段中的重要性更加突出^[4]。目前利用高纯石英资源加工生产的玻璃产品,包括石英坩埚、石英管、石英砵、石英棒等,同一种矿石不同的应用方向和产品类型所用的矿石加工工艺、处理流程、药剂制度并不相同,其产品质量与应用方向也差异迥异,如不同勘查阶段矿石加工选冶试验程度和工作内容是什么,如何设计高纯石英选矿提纯试验,是否需要多次酸洗,是否需要增加氯化焙烧工艺,如何定位产品以保证资源价值最大化和可行性,均是各企业和科研机构的核心技术,存在一定壁垒性。对于高纯石英砂的实际生产加工而言,通常矿石加工选冶的成本在整个生产成本构成中至少占50%以上,不同的生产工艺其成本相差几倍,直接影响到技术经济评价结果,进而影响是否开展后续勘查开发工作^[47]。矿石加工选冶试验复杂性和不可参考性,决定了目前在地质勘查过程中很难合理开展选冶提纯试验,准确开展高纯石英资源技术经济评价,制约了高纯石英资源合理评价和勘查工作高效开展。

3.5 高纯石英资源地质勘查规范欠缺

高纯石英作为重要的战略性资源,国家和行业高度重视高纯石英资源安全保障工作^[46,34],目前已正式将高纯石英矿列为我国第174个矿种,亟需开展相应的地质勘查工作。由于以往高纯石英矿并不是独立矿种,因此,针对性的高纯石英地质勘查规范并未出台。目前唯一相关的地质矿产行业标准为《高纯石英用硅质原料评价工作指南》(DZ/T 0467—2024),虽规定了高纯石英的采样、矿石质量评价、常用工艺矿物学评价方法等内容,但更多的是针对矿石质量判断和 workflows 等矿石评价层面内容,针对地质勘查过程中矿床层面的相关内容较少。由于高纯石英对原料矿石来源、矿体稳定性、原料矿石质量特殊要求,勘查评价方法和工作内容明显区别于常规硅质原料及其他矿种,目前我国高纯石英的勘查评价过程中,如矿床勘查类型如何确定、矿床工业类型如何划分、矿产资源资源储量估算方法适用性如何、资源量规模如何划分确定等系列关键问题仍未解决,高纯石英勘查技术体系还未建立,专门针对高纯石

英资源的地质勘查规范未制定,导致在高纯石英原料矿床地质勘查过程中存在无标准可依、资源储量估算和评审无依据可循等一系列亟需解决的问题,严重制约我国高纯石英资源的勘查开发和矿政管理工作。

4 思考与建议

高纯石英是一种重要的战略性资源,随着战略性新兴产业的快速发展,未来高纯石英应用领域和资源需求量将进一步扩大,国家对高纯石英资源安全保障提出了更高的要求。地质找矿勘查是保障国家能源资源安全的基础性工作,为提升高纯石英资源勘查工作质量,结合目前找矿勘查存在问题,提出如下建议。

1)深化高纯石英矿床成因、矿物学特征及矿体物化探特征等基础理论研究,形成高纯石英野外快速识别评价技术和高效勘查方法组合,提高找矿勘查效率。深入剖析不同类型高纯石英原料矿床野外地质产状、矿石手标本特征、矿物组成特征、石英晶体形态等野外表现形式,系统总结高纯石英矿床和矿石矿物典型识别特征,研究地质勘查过程中地物化遥及探矿工程等手段方法在勘查找矿过程中的适用性,形成高纯石英原料矿石野外快速识别评价技术和多维度多手段组合的高效勘查方法组合,实现潜力高纯石英原料矿石快速筛选,提高找矿勘查效率。

2)研究制定高纯石英矿一般矿床工业指标,支撑矿体圈定、资源量估算等工作。结合高纯石英资源特点和应用特点,明确光伏、半导体、电光源等不同应用领域对高纯石英砂技术要求,以及高纯石英原料矿石加工试验技术性能与矿石品级划分关系。解剖我国已发现的高纯石英典型矿床,借鉴以往脉状矿体开采技术特点,论证制定我国高纯石英矿床开采条件一般技术指标。尽快研究制定高纯石英资源一般矿床工业指标参考并实践,支撑高纯石英资源量估算。

3)加强高纯石英资源选矿提纯试验技术攻关,明确不同地质勘查阶段试验程度、工作内容和技术要求,支撑高纯石英资源地质勘查工作。加强基础工艺矿物学研究,研究高纯石英矿石矿物组成、石英结晶特性、包裹体含量、杂质含量与矿石质量关系,系统研究和总结不同应用方向的矿石处理技术与产品质量关系,形成一批能复制可推广的矿石加工试验技术,结合高纯石英资源特点明确不同地质勘查阶段选矿提纯试验开展工作内容与工作程度,支撑地质勘查中的矿石加工选冶试验和技术经济评价

工作。

4)制定高纯石英矿地质勘查规范,指导高纯石英找矿勘查工作。充分解剖我国目前已发现不同类型高纯石英矿床,系统研究高纯石英矿床勘查类型确定要素、矿床工业类型划分要素、资源储量估算方法、工作手段及工程控制程度、工作质量等技术要求,构建高纯石英原料矿床勘查评价技术体系,编制高纯石英资源地质勘查规范,指导我国高纯石英资源地质勘查工作,为我国高纯石英资源的勘查开发和矿政管理提供支撑。

参考文献(References):

- [1] 张亮,刘磊,朱黎宽,等.关于高纯石英原料矿石地质学评价方法的探讨[J].*岩石学报*,2024,40(4):1311-1326.
ZHANG Liang, LIU Lei, ZHU Likuan, et al. Discussion on the geological evaluation for high purity quartz raw material[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2024, 40(4): 1311-1326.
- [2] 中华人民共和国自然资源部.高纯石英用硅质原料评价工作指南: DZ/T 0467—2024[S].北京:地质出版社,2024.
- [3] 张海敏,张亮,刘磊,等.全球高纯石英资源开发利用现状及供需分析[J].*矿产保护与利用*,2022,42(5):49-54.
ZHANG Haiqi, ZHANG Liang, LIU Lei, et al. Development, utilization, supply and demand of global high purity quartz resources: a systematic review and meta-analysis[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(5): 49-54.
- [4] 王自国.我国高纯石英产业战略布局思考[J].*中国矿业*,2021,30(S2):1-3.
WANG Zigu. Thoughts on the strategic layout of China's high purity quartz industry[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(S2): 1-3.
- [5] 张生辉,王振涛,李永胜,等.中国关键矿产清单、应用与全球格局[J].*矿产保护与利用*,2022,42(5):138-168.
ZHANG Shenghui, WANG Zhentao, LI Yongsheng, et al. List, application and global pattern of critical minerals of China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(5): 138-168.
- [6] 鞠建华,张照志,潘昭帅,等.我国战略性新兴产业矿产厘定与“十四五”需求分析[J].*中国矿业*,2022,31(9):1-11.
JU Jianhua, ZHANG Zhaozhi, PAN Zhaoshuai, et al. Determination of mineral resources in China's strategic emerging industries and analysis of the demand of the "14th five year plan" [J]. *China Mining Magazine*, 2022, 31(9): 1-11.
- [7] MÜLLER A, WANVIK J E, IHLEN P M. Petrological and chemical characterisation of high-purity quartz deposits with examples from Norway[J]. *Springer Geology*, 2012(1): 71-118.
- [8] 李作敏,谭秀民,张亮,等.我国石英资源的开发利用特点及应用进展[J].*矿产保护与利用*,2024,44(2):115-123.
LI Zuomin, TAN Xiumin, ZHANG Liang, et al. Utilization characteristics and application progress of quartz resources[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2024, 44(2): 115-123.
- [9] JACAMON F, LARSEN R B. Trace element evolution of quartz in the charnockitic Kleivan granite, SW-Norway: the Ge/Ti ratio of quartz as an index of igneous differentiation[J]. *Lithos*, 2009, 107(3-4): 281-291.
- [10] MÜLLER A, MÜLLER M K. Hydrogen speciation and trace element contents of igneous, hydrothermal and metamorphic quartz from Norway[J]. *Mineralogical Magazine*, 2009, 73(4): 569-583.
- [11] GÖTZE J. Chemistry, textures and physical properties of quartz-geological interpretation and technical application[J]. *Mineralogical Magazine*, 2009, 73(4): 645-671.
- [12] BREITER K, ĎURIŠOVÁ J, DOSBABA M. Chemical signature of quartz from S- and A- type rare-metal granites: a summary[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 125: 103674.
- [13] MÜLLER A, KEYSER W, SIMMONS W B, et al. Quartz chemistry of granitic pegmatites: implications for classification, genesis and exploration[J]. *Chemical Geology*, 2021, 584: 120507.
- [14] GÖTZE J, PAN Y M, MÜLLER A, et al. Trace element compositions and defect structures of high-purity quartz from the Southern Ural region, Russia[J]. *Minerals*, 2017, 7(10): 189.
- [15] AL-ANI T, GRÖNHOLM S, POHJOLAINEN E, et al. High purity quartz (HPQ): mineralogical, geochemical and their potential occurrences in Finland[R]. Kuopio: Geological Survey of Finland, 2019.
- [16] ZHOU H Y, MÜLLER A, BERNDT J. Quartz chemistry fingerprints melt evolution and metamorphic modifications in high-purity quartz deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2023, 356: 179-195.
- [17] 张海敏,张宏丽,马亚梦,等.伟晶岩型高纯石英资源全链条调查评价体系的建立与实践:以北秦岭地区调查评价为例[J].*矿产保护与利用*,2022,42(5):15-21.
ZHANG Haiqi, ZHANG Hongli, MA Yameng, et al. Establishment and practice of a whole chain survey and evaluation system for pegmatite-type high purity quartz resources: a case study in North Qinling Region, China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(5): 15-21.
- [18] 杨晓勇,孙超,曹荆亚,等.高纯石英的研究进展及发展趋势[J].*地学前缘*,2022,29(1):231-244.
YANG Xiaoyong, SUN Chao, CAO Jingya, et al. High purity quartz: research progress and perspective review[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(1): 231-244.
- [19] 王九一.全球高纯石英原料矿的资源分布与开发现状[J].*岩石矿物学杂志*,2021,40(1):131-141.
WANG Jiuyi. Global high purity quartz deposits: resources distribution and exploitation status[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2021, 40(1): 131-141.
- [20] 赵海波,王红杰,张勇,等.东秦岭伟晶岩型高纯石英矿地球化学、锆石 U-Pb 及 Hf 同位素研究:对高纯石英找矿方向的探讨[J].*中国地质*,2024,51(1):42-56.
ZHAO Haibo, WANG Hongjie, ZHANG Yong, et al. Geochemistry, zircon U-Pb and Hf isotopes of the high-purity pegmatite-quartz deposits in the Eastern Qinling and discussion on its prospecting direction[J]. *Geology in China*, 2024, 51(1): 42-56.
- [21] LONDON D. Ore-forming processes within granitic pegmatites[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 101: 349-383.
- [22] 张晔,陈培荣.美国 Spruce Pine 与新疆阿尔泰山地区高纯石英伟晶岩的对比研究[J].*高校地质学报*,2010,16(4):426-435.
ZHANG Ye, CHEN Peirong. Characteristics of granitic pegmatite

- with high-purity quartz in Spruce Pine Region, USA and Altay Region of Xinjiang, China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2010, 16(4): 426-435.
- [23] 张海敏, 朱黎宽, 赵海波, 等. 河南卢氏龙泉坪伟晶岩型高纯石英矿床的首次发现及找矿意义[J]. *矿产保护与利用*, 2022, 42(4): 153-158.
- ZHANG Haiqi, ZHU Likuan, ZHAO Haibo, et al. First discovery of the Longquanping pegmatitic high-purity quartz deposit in the area of Lushi, Henan: implications for exploration[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(4): 153-158.
- [24] 张海敏, 谭秀民, 马亚梦, 等. 新疆阿尔泰伟晶岩型高纯石英矿床地质特征及4N8级产品制备技术[J]. *矿产保护与利用*, 2022, 42(5): 1-7.
- ZHANG Haiqi, TAN Xiumin, MA Yameng, et al. Geological characteristics of pegmatite type high-purity quartz in Altai, Xinjiang and preparation technology of 4N8 grade products[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(5): 1-7.
- [25] 唐春花, 张生辉, 袁晶, 等. 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[J]. *地质通报*, 2024, 43(5): 667-679.
- TANG Chunhua, ZHANG Shenghui, YUAN Jing, et al. Deposit characteristics and potential resources of silicon material for high-purity quartz of muscovite-pegmatite-granite type in Ningdu, Jiangxi Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(5): 667-679.
- [26] 唐春花, 楼法生, 潘家永, 等. 高纯石英用硅质原料地质勘查中的基本概念和关键技术及江西资源前景[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 46(5): 437-445.
- TANG Chunhua, LOU Fasheng, PAN Jiayong, et al. Basic concepts and key technologies for geological exploration of silicon material for high-purity quartz and potential resources in Jiangxi Province[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2023, 46(5): 437-445.
- [27] 王安书, 张智慧, 张亚增, 等. 花岗伟晶岩制备高纯石英砂可行性研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2022(2): 81-86.
- WANG Anshu, ZHANG Zhihui, ZHANG Yazeng, et al. Feasibility study on preparation of high purity quartz sand from granite pegmatite[J]. *Nonferrous Metal(Mineral Processing Section)*, 2022(2): 81-86.
- [28] 罗小南, 索忠连, 茹朋, 等. 河南省高纯石英资源现状及产业发展的思考[J]. *矿产勘查*, 2023, 14(11): 2271-2277.
- LUO Xiaonan, SUO Zhonglian, RU Peng, et al. Study on the current situation and industrial development of high purity quartz resources in Henan Province[J]. *Mineral Exploration*, 2023, 14(11): 2271-2277.
- [29] 颜玲亚, 高树学, 陈正国, 等. 我国脉石英矿床类型及成矿规律[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2020(5): 10-14.
- YAN Lingya, GAO Shuxue, CHEN Zhengguo, et al. Types and metallogenic regularity of vein quartz deposit in China[J]. *China Non-Metallic Minerals Industry*, 2020(5): 10-14.
- [30] 詹建华, 王依, 陈正国, 等. 我国脉石英资源现状分析[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2020(5): 1-4.
- ZHAN Jianhua, WANG Yi, CHEN Zhengguo, et al. Analysis of current situation of vein quartz resources in China[J]. *China Non-Metallic Minerals Industry*, 2020(5): 1-4.
- [31] 郝文俊, 詹建华, 张徐, 等. 安徽脉石英矿地质特征及成矿规律探讨[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2024(2): 1-5.
- HAO Wenjun, ZHAN Jianhua, ZHANG Xu, et al. Geological characteristics and metallogenic regularity of vein quartz deposit in Anhui Province[J]. *China Non-Metallic Minerals Industry*, 2024(2): 1-5.
- [32] 胡祥琳, 李育彪, 李佩悦, 等. 江西某脉石英制备4N5级高纯石英砂试验研究[J]. *非金属矿*, 2024, 47(2): 59-62.
- HU Xianglin, LI Yubiao, LI Peiyue, et al. Experimental study on the preparation of 4N5 high-purity quartz sand from vein quartz in Jiangxi Province[J]. *Non-Metallic Mines*, 2024, 47(2): 59-62.
- [33] 曹高伟, 任子杰, 刘志, 等. 碱处理对脉石英酸浸提纯影响[J]. *中国矿业*, 2022, 31(6): 158-163.
- CAO Gaowei, REN Zijie, LIU Zhi, et al. Improvement of vein quartz purification technology by alkali treatment[J]. *China Mining Magazine*, 2022, 31(6): 158-163.
- [34] 张艳飞, 陈其慎, 邢佳韵, 等. 中国“新能源矿产目录”厘定研究[J]. *中国矿业*, 2024, 33(1): 1-11.
- ZHANG Yanfei, CHEN Qishen, XING Jiayun, et al. Research on the determination of “list of new energy minerals” in China[J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(1): 1-11.
- [35] 赵超, 许安民, 李鹏, 等. 关于我国战略性矿产供应安全的思考[J]. *中国矿业*, 2024, 33(S2): 1-5.
- ZHAO Chao, XU Anmin, LI Peng, et al. Thoughts on supply security of strategic mineral resources in China[J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(S2): 1-5.
- [36] 刘江山. 关键矿产资源供应链安全问题对策研究[J]. *中国矿业*, 2024, 33(S1): 21-24, 35.
- LIU Jiangshan. Study on countermeasures for ensuring the security of the supply chain of key mineral resources[J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(S1): 21-24, 35.
- [37] 成金华, 阮晟哲, 宋益. 技术创新视角下中国关键矿产最优生产路径研究[J]. *中国矿业*, 2024, 33(10): 1-11.
- CHENG Jinhua, RUAN Shengzhe, SONG Yi. Study on the impact of technological innovation on the optimal production path of critical minerals in China[J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(10): 1-11.
- [38] 汪灵. 石英的矿床工业类型与应用特点[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(6): 39-47.
- WANG Ling. Industrial types and application characteristics of quartz ore deposits[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(6): 39-47.
- [39] 秦克章, 刘宇超, 赵俊兴, 等. 花岗伟晶岩分异演化与含矿性评价-从造岩矿物组构视角[J]. *地质学报*, 2024, 98(5): 1527-1549.
- QIN Kezhang, LIU Yuchao, ZHAO Junxing, et al. Indication of magma evolution and ore-bearing potential on granitic pegmatite in the view of texture composition of rock-forming minerals[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(5): 1527-1549.
- [40] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 固体矿产勘查工作规范: GB/T 33444—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [41] 刘艳飞, 颜玲亚, 柳群义, 等. 我国重要非金属矿产评价研究及重点勘查建议[J]. *中国矿业*, 2019, 28(10): 85-91.
- LIU Yanfei, YAN Lingya, LIU Qunyi, et al. Evaluation study on the important non-metallic minerals in China and suggestions for key ex-

- ploration[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(10): 85-91.
- [42] 杨建锋,余韵,姚晓峰,等.矿产勘查推动新质生产力发展路径初探[J].*中国矿业*, 2024, 33(5): 39-45.
YANG Jianfeng, YU Yun, YAO Xiaofeng, et al. A preliminary study on developing routes of new quality productive forces via mineral exploration[J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(5): 39-45.
- [43] 范俊波,杨荣,郝雪峰,等.音频大地电磁测深在甲基卡深部找矿预测中的应用研究[J].*地质找矿论丛*, 2022, 37(1): 111-117.
FAN Junbo, YANG Rong, HAO Xuefeng, et al. Application of audio-frequency magnetotelluric sounding to deep prospecting and prediction of rare metal deposit in Jiajika Area[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2022, 37(1): 111-117.
- [44] CÉRNY P, ERCIT TS. The classification of granitic pegmatites revisited[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2005, 43(6): 2005-2026.
- [45] ZHOU Q F, QIN K Z, TANG D M. Mineralogy of columbite-group minerals from the rare-element pegmatite dykes in the East-Qinling orogen, Central China: implications for formation times and ore genesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2021, 218: 104809.
- [46] 中华人民共和国自然资源部.矿产地质勘查规范 硅质原料类: DZ/T 0207—2020[S].北京:地质出版社, 2024.
- [47] 张亮,冯安生,郭保健,等.矿产资源概略研究、预可行性研究、可行性研究区别探讨[J].*中国矿业*, 2020, 29(3): 18-23.
ZHANG Liang, FENG Ansheng, GUO Baojian, et al. The differences study of scoping study, pre-feasibility study, feasibility study on mineral resource[J]. *China Mining Magazine*, 2020, 29(3): 18-23.