

石英矿物资源的分离提纯及材料化应用

# 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

张海啟<sup>1,2,3</sup>, 张宏丽<sup>1,2,3</sup>, 马亚梦<sup>1,2,3</sup>, 朱黎宽<sup>1,2,3</sup>, 郭理想<sup>1,2,3</sup>, 刘广学<sup>1,2,3</sup>, 郭峰<sup>1,2,3</sup>, 王守敬<sup>1,2,3</sup>

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

中图分类号: P619.23<sup>3</sup>; TD973<sup>3</sup> 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2022)05-0015-07  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.05.003

**摘要** 高纯石英作为战略性新兴产业的关键基础材料, 对保障我国的资源安全至关重要。以伟晶岩型高纯石英资源为研究对象, 建立了国内唯一的高纯石英资源全链条调查评价体系, 涵盖“成矿远景区预测—调查区圈定—样品精准采集—预处理—选矿深度除杂—化学深度提纯—产品检测分析”, 并在北秦岭地区进行了方法验证。通过北秦岭地区 350 条伟晶岩脉评价研究, 结果表明该区域 11 条伟晶岩脉体可制备出 4N 级( $\text{SiO}_2$  含量 $\geq 99.99\%$ )甚至 4N5 级( $\text{SiO}_2$  含量 $\geq 99.995\%$ )以上的高纯石英。该方法体系实现了北秦岭地区伟晶岩型高纯石英资源的精准调查评价、以资源特征为依据的分级评价。针对不同脉体建立配套的开发利用方案及产品应用分析, 充分保证了优质资源优用于终端市场。该研究为我国伟晶岩型高纯石英资源的找矿及利用提供借鉴, 有力地支撑服务我国战略性新兴产业关键资源材料的安全供给。

**关键词** 伟晶岩型; 高纯石英; 石英矿床; 全链条评价体系; 北秦岭地区

## 1 前言

高纯石英是世界稀缺、我国短缺的战略性资源, 广泛应用于半导体、光纤、光伏、光学、电光源等领域, 是新一代信息产业、新能源等战略性新兴产业的关键基础材料。以芯片制造为例, 高纯石英资源制备的坩埚、法兰等是芯片制造关键环节不可替代的支撑保护材料, 对整个芯片产业起到“四两拨千斤”的作用。

据 CBC 金属网资料统计<sup>[1]</sup>, 全球可以加工 4N5 级(即  $\text{SiO}_2$  含量 $\geq 99.995\%$ , 下同)高纯石英及以上质量的高纯石英资源量约 2 000 万 t, 90% 集中在美国(1 822 万 t)。4N8 级及以上高端高纯石英原料全部来自于美国矽比科(原尤尼明)公司的花岗伟晶岩型石英资源。我国是全球最大的高纯石英工业原料进口国, 每年进口 4N 级及以上高纯石英资源 14.45 万 t, 约占全球总进口量(20.54 万 t)的 70%<sup>[2]</sup>, 用于石英坩埚内层料的 4N8 级高端高纯石英更是完全依赖进口。加快高纯石英资源的国产化自主供给迫在眉睫。

石英资源的工业类型主要有脉石英、水晶、石英砂岩、石英岩、粉石英、天然石英砂、伟晶岩石英 7 种。高纯石英几乎完全由  $\text{SiO}_2$  组成, 在自然界中十分少见(如水晶), 通常通过对天然形成的较纯净石英进行提纯加工得到<sup>[3-5]</sup>。现阶段, 国内高纯石英资源的找矿方向主要侧重于脉石英, 但已有研究表明, 可用于提取高纯石英的脉石英资源储量仅 709 万 t<sup>[6]</sup>, 且多呈脉状、鸡窝状分布, 矿床规模小、矿石品质不稳定, 这些脉石英矿床中可能只有很少一部分能生产出适用于半导体工业和芯片制造行业的高纯石英砂, 难以满足高纯石英高端产品大规模生产的需要, 亟待寻找矿体规模大、矿石品质稳定的新类型资源。伟晶岩型石英资源具有规模大、一般杂质元素较少、品质稳定、流体包裹体含量较低等特征, 成为我国寻找高纯石英资源的新方向<sup>[7-9]</sup>。由于我国伟晶岩型高纯石英地质勘查、矿床研究、储量评估及开发利用之前处于空白状态, 尚未获得伟晶岩型高纯石英找矿发现。

是否可制备出高纯石英与伟晶岩脉体的资源禀

收稿日期: 2022-09-25

基金项目: 中国地质调查项目(DD20221698)

作者简介: 张海啟(1967—), 男, 山东费县人, 正高级工程师, 博士, 主要从事矿产地质调查和矿产资源综合利用研究工作。

通信作者: 张宏丽(1986—), 女, 吉林松原人, 副研究员, 博士, 主要从事矿产地质调查和岩矿测试研究工作; 马亚梦(1986—), 女, 河南郑州人, 助理研究员, 硕士, 主要从事矿产资源综合利用工作。

赋息息相关,同一脉体内不同位置石英晶体工艺矿物学性质的微小差异都会导致最终石英产品品质的差异。因此,我国目前矿产资源调查评价通过选冶试验进行资源品质评价的方法并不适用于高纯石英资源。行业目前对于高纯石英原料选择还存在较大的盲目性,特别是伟晶岩型高纯石英的资源评价。不同地区伟晶岩在岩石成因、矿物组成、物理化学条件、成矿时代等方面存在差异,要从我国广泛分布的各类伟晶岩中找寻可制备高纯石英的资源,为提高找矿效率,用一套系统的方法逐步缩小找矿范围势在必行。同时,高纯石英原料的优劣与杂质元素含量的高低并非简单的对应关系<sup>[9]</sup>,而与原料的工艺矿物学、杂质元素赋存和流体包裹体特征有关,需从原料—工艺矿物学—加工利用等各个环节详细研究,才能科学评价高纯石英原料制备高纯石英产品的潜力。

分析测试作为准确衡量、界定不同品质高纯石英产品的重要手段,目前缺乏统一标准。我国现行高纯石英类分析测试标准方法与高纯石英市场通用指标元素界定指标种类、高低不统一等原因<sup>[10-14]</sup>,各高纯石英研发机构与企业在产品质量控制中一般采用内部认定的分析测试方法,并最终以产品在终端材料市场的应用反馈来界定分析测试的准确性。因此,作为高纯石英资源从原料端到产品端的重要支撑技术,配套建立原料—工艺矿物学研究—加工利用各个环节样品的测试技术至关重要。

综上所述,作者研究团队将地质学、矿物学、矿物加工与冶金工程、检测分析等多学科交叉融合,开创性地建立国内唯一的高纯石英全链条调查评价体系,并以北秦岭地区伟晶岩型高纯石英资源为研究对象进行了实践验证,旨在为我国高纯石英资源调查评价工作提供借鉴,支撑服务我国战略性新兴产业关键资源材料安全供给。

## 2 全链条调查评价体系的内涵

作者研究团队近些年在高纯石英资源调查领域开展了大量的调查研究,系统性建立了“成矿远景区预测—调查区圈定—样品精准采集—预处理—选矿深度除杂—化学深度提纯—产品检测分析”的全链条调查评价体系,如图1所示。

### 2.1 成矿远景区预测

全面收集、整理和综合分析全国以往地质矿产和科研等成果资料,根据伟晶岩(体)脉的岩石学、矿物学、岩石地球化学等特征,初步厘定出具有高纯石英成矿潜力岩(体)脉类型;对具备制备高纯石英资源潜力的伟晶岩进行规模、类型、岩石学、岩石地球化学、成因等特征对比分析,选取成矿远景区。

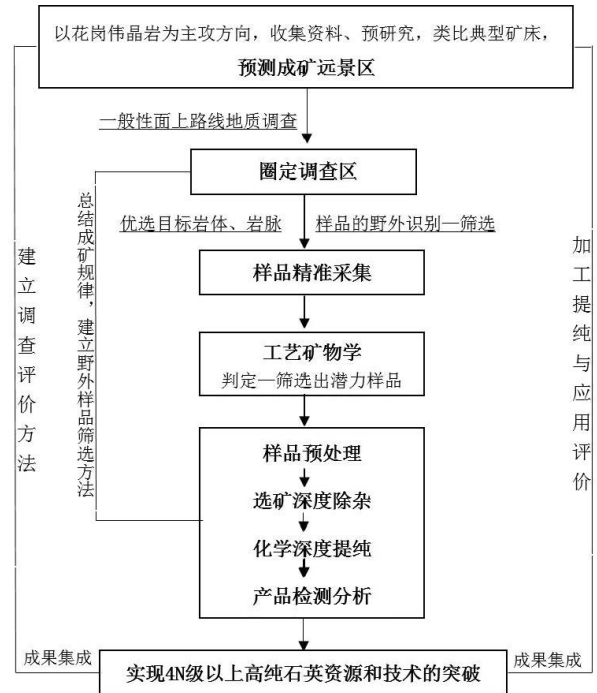


图1 伟晶岩型高纯石英资源全链条调查评价体系  
Fig. 1 Whole chain survey and evaluation system for pegmatite type high purity quartz resources

### 2.2 调查区圈定

根据成矿远景区内伟晶岩的分布,综合考虑伟晶岩中高纯石英禀赋、区域生态红线和矿权分布,圈定重点调查区,编制调查区地质图、成矿规律图和工作部署图等图件,为野外调查、样品采集奠定工作基础。

### 2.3 样品精准采集

全面梳理调查区伟晶岩岩(体)脉分布、规模、类型等特征,基于高纯石英野外识别标志,通过一般性面上路线调查,采集调查区内代表性样品;依据石英在显微镜下透明度、交代关系和风化程度的差异,通过便携电子显微照相技术对高纯石英样品开展野外快速初步筛选。

在野外样品筛选的基础上,开展代表性样品工艺矿物学研究。将样品破碎后制备成环氧树脂靶样,利用FEI MLA 650 矿物解离度分析仪对其矿物组成及含量进行定量检测,采用ZEISS Axioskop 40 光学显微镜对样品薄片进行观察鉴定,查明主要矿物的嵌布特性,精准获取矿物代表性特征。

将代表性样品进行破碎、筛分,利用Olympus SZ61 双目视显微镜人工挑选石英单矿物,制备油浸片,利用ZEISS Axioskop 40 光学显微镜观察石英中的流体包裹体发育情况,实现低流体包裹体高纯石英原料的源头筛选。

### 2.4 样品预处理

采用高压辊磨+精细分级手段使大块矿石沿不同

矿物的结晶面进行解离,对合格粒级产品进行萃级别分离,利用风力分选+光电色选工艺预先综合回收矿石中的片状云母和颗粒状长石,并将石英按照透明度进行分质分级,提高矿石综合利用率,降低后续石英除杂难度。

### 2.5 选矿深度除杂

采用精细制砂—重选—磁选—浮选等物理联合选别工艺的高纯石英原料深度选矿除杂标准评价流程,快速精准地完成伟晶岩型石英的选矿提纯,去除几乎全部单体解离的脉石矿物和绝大部分贫连生体,获得 SiO<sub>2</sub> 纯度为 3N 级以上的高纯石英精矿。该选矿除杂标准流程是在对大量不同杂质类型、不同杂质含量的伟晶岩型高纯石英样品进行除杂的基础上探索形成的。

### 2.6 化学深度提纯

针对高纯石英精矿,采用混合酸浸、煅烧水淬等联合处理工艺的高纯石英深度化学提纯标准流程,获得 SiO<sub>2</sub> 纯度为 4N 以上的高纯石英砂。该提纯标准流程是在大量的伟晶岩型高纯石英精矿化学深度提纯试验中优化形成的,能够有效去除石英晶间杂质和大部分包裹体杂质。

### 2.7 产品检测分析

建立高纯石英产品分析测试专用平台,通过严格控制样品化学前处理的场所环境质量,保证样品分析测试过程无环境干扰;基于 1.000 0 g 以上样品称样量,百级化学安全柜内常压—混酸溶样后,采用电感耦合等离子体发射光谱法/质谱法联用的测量手段,实现样品中铝、钾、钙、钠、镁、铁、钛、锂、硼、铬、铜、锰、镍、磷、锆、铀、钍、钽、锆及稀土元素的含量测定<sup>[15-16]</sup>。同时,根据高纯石英样品中痕量杂质元素在样品中分布不均匀的特点,采用 3 次平行测定取平均值的方法,最终确定样品内杂质元素含量水平。

## 3 全链条评价体系的应用

美国尤尼明公司 IOTA 高纯石英系列产品在国际上占有垄断地位,根本原因是拥有迄今为止世界上唯一发现的独特高纯石英优质原料,该原料为产自美国北卡罗来纳州 Spruce Pine 地区的花岗伟晶岩。在大量的实践调查与类比分析的基础上,作者团队将北秦岭地区花岗伟晶岩与美国 Spruce Pine 伟晶岩进行岩石地球化学特征对比研究,显示其具有高纯石英成矿潜力。因此,选择北秦岭地区进行全链条体系的方法验证,以实现北秦岭地区伟晶岩型高纯石英资源的精准调查评价。

### 3.1 预测成矿远景区及圈定调查区

基于美国 Spruce Pine 花岗伟晶岩型高纯石英矿床成矿地质背景和成矿规律,根据我国部分预测目标区岩(体)脉的矿物学、岩石学、岩石地球化学等特征,厘定出具有高纯石英成矿潜力的岩(体)脉的类型,选取北秦岭作为高纯石英的成矿远景区。北秦岭伟晶岩带位于秦祁昆造山系秦岭弧盆系的北秦岭地块,朱夏断裂带与商丹断裂带之间,受加里东期构造岩浆岩带控制,侵位于中新元古界峡河岩群、古元古界秦岭岩群片岩、片麻岩中,形成 4 个密集区,是开展伟晶岩型高纯石英找矿的有利地区。

依据北秦岭成矿远景区内伟晶岩中高纯石英禀赋特征、区域生态红线和矿权分布情况,优选黄柏沟-龙泉坪地区作为重点调查区。该地区花岗伟晶岩脉分布密集,多分布在花岗岩体的内外接触带,特别是外带,大小悬殊。其中脉体长度在 200~500 m、宽在 20~30 m 的伟晶岩脉占 70%,脉体长度约 450~600 m 不等、宽 40~80 m 不等的伟晶岩脉占 30%。脉体分带良好,自边部至核部,主要组成矿物粒径逐渐变粗。区内伟晶岩脉一般分异程度不高,结构、构造较简单,脉体分布集中、延伸稳定、规模较大。

### 3.2 高纯石英工艺矿物学评价

基于野外调查与室内研究相结合,作者团队对北秦岭 350 条伟晶岩脉进行野外样品精准采集。评价显示区内 11 条伟晶岩脉体可制备出 4N 级高纯石英,分属黑云母-微斜长石型、白云母-微斜长石型、白云母-二长型、白云母-钠长石型 4 个类型,主要矿物组成为钾长石、钠长石、石英、云母及少量石榴子石、电气石,石英矿物含量 25%~40%。高纯石英矿体厚度较稳定,变化不大,矿石质量稳定,矿床受构造影响轻微。

从 11 条可制备出 4N 级高纯石英的伟晶岩脉体中筛选出 LD-05、LD-10、LS12 和 DL106 四件代表性样品开展详细的工艺矿物学研究,其矿物组成及含量分析结果如表 1 所示。LD-05 样品为白云母花岗伟晶岩,主要矿物组成为钠长石、石英、钾长石、白云母和斜长石,此外还可见少量磷灰石、石榴子石和黑云母等。LD-10 和 LS12 样品为含石榴子石花岗伟晶岩,主要矿物组成为石英、钾长石和钠长石,此外还可见少量白云母、黑云母和石榴子石等。DL106 样品为含电气石花岗伟晶岩,主要矿物组成为斜长石、石英、钾长石和白云母,此外还可见少量黑云母、电气石和磷灰石等。

对代表性样品进行破碎,人工挑选石英单矿物制备油浸片,利用偏反光显微镜对其观察发现石英颗粒可分为纯净颗粒和非纯净颗粒,纯净颗粒几乎不含流体包裹体和矿物包裹体等杂质,非纯净的石英颗粒包

表 1 代表性样品的矿物组成及含量

Table 1 Mineral composition and content of representative samples

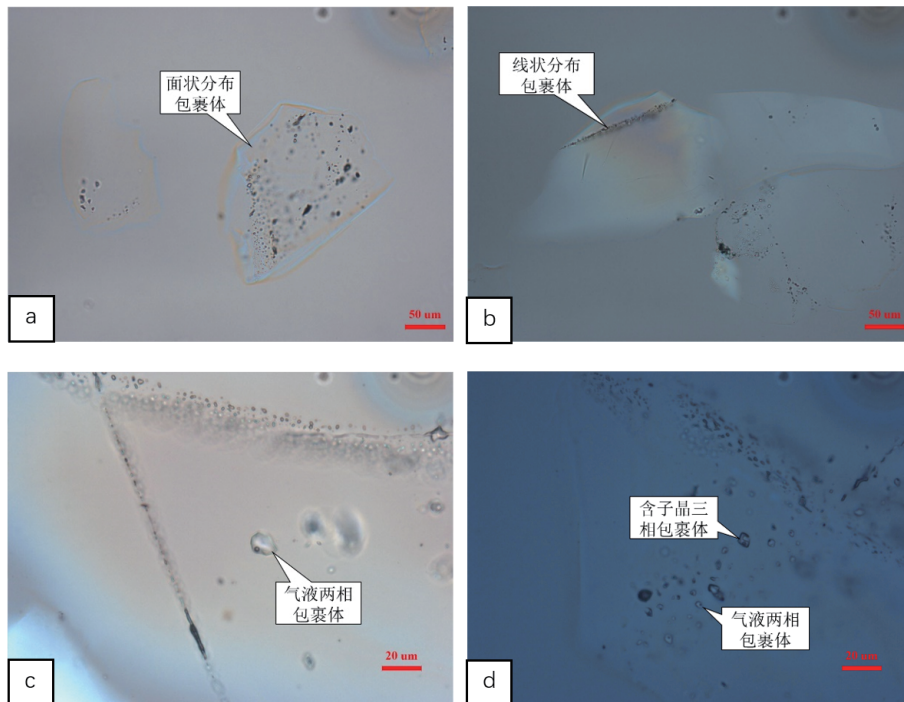
LD-05		LD-10		LS12		DL106	
矿物名称	含量/%	矿物名称	含量/%	矿物名称	含量/%	矿物名称	含量/%
钠长石	47.85	石英	36.31	钠长石	50.54	斜长石	47.86
石英	25.85	钾长石	31.19	石英	37.1	石英	44.74
钾长石	15.83	钠长石	30.39	钾长石	5.77	钾长石	5.00
白云母	6.88	白云母	0.97	白云母	5.55	白云母	1.26
斜长石	1.36	黑云母	0.79	钙铝榴石	0.53	黑云母	0.87
磷灰石	0.93	钙铝榴石	0.21	黑云母	0.19	磷灰石	0.12
高岭石	0.48	方解石	0.04	磷灰石	0.12	钙铝榴石	0.06
钙铝榴石	0.42	斜长石	0.02	高岭石	0.09	钛闪石	0.06
针铁矿	0.18	钛闪石	0.02	电气石	0.05	绿泥石	0.01
黑云母	0.17	锆石	0.02	针铁矿	0.03	针铁矿	0.01
磷钇矿	0.03	针铁矿	0.01	独居石	0.02		
锆石	0.02	褐帘石	0.01	方解石	0.01		
		钽石	0.01				
		蛇纹石	0.01				

含流体包裹体和矿物包裹体两类杂质。流体包裹体可见呈面状分布的原生包裹体和呈线状分布的次生包裹体，两类包裹体的尺寸均较小、多数在 10 μm 以下，仅有个别原生包裹体尺寸大于 10 μm(见图 2a、b)。原生包裹体多为气液两相包裹体(见图 2c)和纯液相包裹体，仅见少量含子晶三相包裹体(见图 2d)。次生包裹体尺寸普遍很小，不易分辨其包裹体类型<sup>[8]</sup>。流

体包裹体中原生包裹体含量多于次生包裹体，含量总体较少。矿物包裹体可见呈针状矿物和不规则粒状的不透明矿物等。矿物包裹体含量很少。

#### 4 高纯石英产品精深加工

为使高纯石英矿物达到超高纯程度，采用第二节所述方法进行了高纯石英产品加工和分析测试，对北



a. 呈面状发育的原生包裹体; b. 呈线状发育的次生包裹体; c. 气液两相流体包裹体; d. 气液两相包裹体和含子晶三相包裹体

图 2 石英中包裹体特征

Fig. 2 Characteristics of the inclusions in quartz (a. primary inclusions with the facial distribution; b. secondary inclusions with the linear distribution; c. gas-liquid two-phase fluid inclusion; d. gas-liquid two-phase fluid inclusion and three-phase inclusion containing daughter phase)

秦岭地区代表性样品 LD-05、LD-10、LS12 和 DL106 进行了预处理、选矿深度除杂及化学深度提纯研究。

结果表明, 北秦岭东段不同脉体的高纯石英资源均具备制备高纯石英的潜力, 其中 LD-10 为黑云母伟晶岩型高纯石英资源, Ti 杂质元素含量较高、达 12.47  $\mu\text{g/g}$ , 杂质的去除反应是由 Me-O 键的键能及性质所决定, Ti-O 键键能 > Si-O 键键能<sup>[17-19]</sup>, 故 Ti 极难去除, 制约了 LD-10 进一步制备高端高纯石英的可能, 下一步可进行高 Ti 高纯石英产品的应用潜力评价, 拓宽高 Ti 高纯石英的应用。DL106 中存在于矿物晶格中的 Al 杂质元素含量较高, 适量的 Al 元素能够增强坩埚强度, 但杂质元素过多会导致坩埚产生气泡和色

斑等缺陷, 降低石英坩埚透明度, 严重时还影响坩埚成形<sup>[20]</sup>。LD-05 及 LS12 杂质元素最低, 且表现出相似的杂质元素含量, 是北秦岭东段高纯石英资源中最具潜力的, 可进一步改进工艺, 以制备更高纯度的高纯石英砂。

经预处理及选矿深度除杂, 上述四件代表性样品的高纯石英精矿  $\text{SiO}_2$  含量可达 99.95% 以上, 部分达到了 99.98%, 主要杂质元素含量如表 2 所示。经化学深度提纯, 四种代表性样品制备的高纯石英砂  $\text{SiO}_2$  含量达到或接近 99.995%, 主要杂质元素含量如表 3 所示。

表 2 代表性样品经选矿深度除杂后主要杂质元素含量

( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )

Table 2 Main impurity elements content of representative samples after deep beneficiation de-impurity

样品编号	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	Ti	B	Cr	Cu	Li	Mn	Ni	P	Zr	$\text{SiO}_2$
LD-05	265	42.8	22.6	40.3	4.49	115	4.12	29.4	1.35	0.09	0.59	2.33	0.00	10.2	2.11	99.95
LD-10	113	21.0	6.36	25.9	1.96	37.5	13.2	32.2	0.74	0.00	0.12	0.72	0.00	0.058	0.36	99.97
LS12	123	27.6	12.9	26.2	4.02	47.1	6.79	0.75	0.53	0.09	1.34	0.26	0.00	1.70	1.95	99.97
DL106	73.8	32.3	5.14	5.02	1.79	26.6	6.11	0.00	0.65	0.07	1.49	0.52	0.00	2.30	1.54	99.98

注:  $\text{SiO}_2$  单位为 %。

表 3 代表性样品经化学深度提纯后主要杂质元素含量

( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )

Table 3 Main impurity elements content of representative samples after chemical deep purification

样品编号	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	Ti	B	Cr	Cu	Li	Mn	Ni	P	Zr	$\text{SiO}_2$
LD-05	24.8	2.15	1.23	0.60	0.13	5.66	3.35	1.43	0.00	0.01	0.45	0.12	0.00	0.00	0.11	99.996
LD-10	18.6	5.66	0.55	1.14	0.11	3.32	12.5	0.65	0.00	0.13	0.09	0.05	0.00	0.00	0.11	99.995
LS12	26.5	2.28	0.30	1.32	0.00	2.96	5.65	0.37	0.00	0.04	1.00	0.07	0.00	0.00	0.05	99.995
DL106	41.4	0.57	0.12	0.40	0.00	2.58	5.64	0.82	0.00	0.00	1.07	0.06	0.00	0.00	0.00	99.994

注:  $\text{SiO}_2$  单位为 %。

作者研究团队利用自主研发的矿物显微成像自动分析系统对石英中的流体包裹体指数进行了计算<sup>[21]</sup>, 结果见表 4。从表 4 可以看出, 以美国尤尼明公司生产的标准砂(IOTA-STD)为参考标准, 将其设置为 100,

越接近该值表明其产品的流体包裹体越少, 产品品质越好。北秦岭地区典型样品经过提纯后的产品中流体包裹体指数值均在 90 以上, 其中以 LD-05 样品中的包裹体指数最高, 接近美国尤尼明公司标准砂水平。

表 4 典型样品提纯后产品流体包裹体指数

Table 4 Fluid inclusion index of typical samples after purification

样品编号	尤尼明标准砂 (IOTA-STD)	LD-05	LD-10	LS12	DL106
流体包裹体指数	100	97.79	94.41	95.92	93.89

## 5 结论与展望

不同于大多数以脉石英为主要找矿方向的研究, 作者团队提出花岗伟晶岩型高纯石英找矿方向, 并取得显著找矿成果, 在北秦岭地区新发现可制备 4N 级伟晶岩型高纯石英矿点 20 余处、4N5 级以上高纯石英矿产地 1 处, 探获高纯石英矿物资源量 69 万 t。

作者团队开创性地建立国内唯一的高纯石英“成矿远景区预测—调查区圈定—样品精准采集—

预处理—选矿深度除杂—化学深度提纯—产品检测分析”全链条调查评价体系, 并选择北秦岭地区为例进行了方法验证。北秦岭地区不同类型典型伟晶岩脉体的石英矿物经过提纯加工后  $\text{SiO}_2$  含量达到或接近 99.995%, 其流体包裹体接近美国尤尼明公司标准砂水平, 表明北秦岭地区伟晶岩型资源具备制备高纯石英产品的潜力。该方法体系实现了北秦岭地区伟晶岩型高纯石英资源的精准调查评价。最重要的是伟晶岩中主要矿物组成相对稳定、嵌布关系相对简单,

该调查评价体系针对不同地区的样品具有较强的可推广、可复制性,可为我国伟晶岩型高纯石英资源的找矿提供借鉴,有力支撑了我国战略性新兴产业关键资源材料的安全供给,具有重要现实意义。

## 后记

依托研究成果,作者团队以“河南省三门峡市卢氏县龙泉坪伟晶岩型高纯石英矿”为题参评了自然资源部矿产勘查技术指导中心开展的“2011—2021年优秀找矿新发现”评选;单位组织申报的自然资源部高纯石英资源开发利用工程技术创新中心已经获批,相关工作得到了自然资源部的认可。

## 参考文献:

- [1] 世界及分国别石英砂产量(年)[R]. CBC金属网, <https://www.cbcie.com/13247/0/list.html>.  
World and country production of quartz sand (year)[R]. CBC Metal Net, <https://www.cbcie.com/13247/0/list.html>.
- [2] 联合国商品贸易署UN Comtrade[EB/OL]. (2020-07-08) [2020-08-15]. <https://comtrade.un.org/data/>.  
UN Comtrade[EB/OL]. (2020-07-08) [2020-08-15]. <https://comtrade.un.org/data/>.
- [3] MÜLLER, A, WANVIK J E, IHLEN P M. Petrological and chemical characterization of high-purity quartz deposits with examples from Norway[M]//Götze, J., Möckel, R. (eds) Quartz: deposits, mineralogy and analytics. Springer Geology. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [4] PAN X D, LI S Q, LI Y K, et al. Resource, characteristic, purification and application of quartz: a review[J]. Minerals Engineering, 2022(183): 107600.
- [5] RUSK, B. Cathodoluminescent textures and trace elements in hydrothermal quartz[M]//Götze, J., Möckel, R. (eds) Quartz: deposits, mineralogy and analytics. Springer Geology. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [6] 焦丽香. 我国脉石英资源开发利用现状及供需分析[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2019(2): 11-14.  
JIAO L X. Current situation and supply demand analysis of the development and utilization of vein quartz resources in China[J]. China Non-metallic Mineral Industry Guide, 2019(2): 11-14.
- [7] 从金瑶. 几种伟晶岩石英的矿理学特征及杂质去除工艺研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2019.  
CONG J Y. Study on oreological characteristics and impurity removal process of several pegmatite quartz[D]. Minayang: Southwest university of science and technology, 2019.
- [8] 张海敏, 马亚梦, 谭秀民, 等. 高纯石英中杂质特征及深度化学提纯技术研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(4): 159-165.  
ZHANG H Q, MA Y M, TAN X M, et al. Research progress on impurity characteristics and deep chemical purification technology in high-purity quartz [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(4): 159-165.
- [9] 王云月, 邓宇峰, 詹建华, 等. 高纯石英原料特征和矿床成因研究现状综述[J]. 地质论评, 2021, 67(5): 1465-1477.  
WANG Y Y, DENG Y F, ZHAN J H, et al. Review on the research of characteristics and ore deposit genesis of high purity raw quartz[J]. Geological Review, 2021, 67(5): 1465-1477.
- [10] 廊坊市市场监督管理局. 电子专用材料单晶硅生长用石英坩埚工艺技术规范: DB1310/T 227—2020[S]. 2020.  
Langfang Market Supervision Administration. Technical specification for quartz crucible process for growth of monocrystalline silicon for special electronic materials: DB1310/T 227—2020[S]. 2020.
- [11] 湖南省经信委. 高纯(SiO<sub>2</sub>≥99.997%)石英砂: DB43/T 1167—2016[S]. 2016.  
Hunan Provincial Economic and Information Commission. High purity (SiO<sub>2</sub>≥99.997%) quartz sand: DB43/T 1167—2016[S]. 2016.
- [12] 全国半导体设备和材料标准化技术委员会. 光伏用高纯石英砂: GB/T 32649—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.  
Semiconductor Equipment and Materials. High purity arenaceous quartz used in photovoltaic applications: GB/T 32649—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [13] 全国半导体设备和材料标准化技术委员会. 电感耦合等离子体光谱法检测石英砂中痕量元素: GB/T 32650—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.  
Semiconductor Equipment and Materials. Determining the content of trace elements in arenaceous quartz by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS): GB/T 32650—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [14] 全国工业陶瓷标准化技术委员会功能陶瓷分技术委员会. 高纯石英中杂质含量的测定方法 电感耦合等离子体原子发射光谱法: JC/T 2027—2010[S]. 2010.  
Functional Ceramics, Determination of impurities in high purity quartz—Inductively coupled plasma atomic emission spectrometry: JC/T 2027—2010[S]. 2010.
- [15] 张宏丽, 倪文山, 刘磊, 等. 冷焰模式-电感耦合等离子体质谱法测定高纯石英中痕量铁[J]. 冶金分析, 2021, 41(7): 28-34.  
ZHANG H L, NI W S, LIU L, et al. Determination of ultra-trace iron in high-purity quartz by cool flame mode-inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Metallurgical Analysis, 2021, 41(7): 28-34.
- [16] 张海敏, 倪文山, 刘磊, 等. 低射频功率-电感耦合等离子体质谱法测定高纯石英样品中痕量钾[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(4): 166-172.  
ZHANG H Q, NI W S, LIU L, et al. Determination of ultra-trace potassium in high purity quartz by low RF power-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(4): 166-172.
- [17] DALMARTELLO E, BERNARDIS S, LARSEN R B, et al. Electrical fragmentation as a novel route for the finement of quartz raw materials for trace mineral impurities[J]. Powder Technology, 2012(224): 209-216.
- [18] KOVALCHUK B M, KHARLOV A V, VIZIR V A, et al. High-voltage pulsed generator for dynamic fragmentation of rocks[J]. The Review of scientific instruments, 2010, 81, 103506. DOI:10.1063/1.3497307.
- [19] KLINE W E, FOGLER H S. Dissolution of silicate minerals by hydrofluoric acid[J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1981, 20(2): 155-161.
- [20] MÜLLER A, WIEDENBECK M, VAN-DEN-KERKHOF A M. Trace element in quartz—a combined electron microprobe, secondary ion mass spectrometry, laser-ablation ICP-MS, and cathodoluminescence study[J]. European Journal of Mineralogy, 2003, 15(4): 747.
- [21] 王守敬, 刘磊, 赵毅, 等. 一种高纯石英中流体包裹体含量的检测方法: 202110644067.9[P]. 2020-06-10.  
WANG S J, LIU L, ZHAO Y, et al. A method for detecting fluid inclusion content in high purity quartz: 202110644067.9[P]. 2020-06-10.

## 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

ZHANG Haiqi<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Hongli<sup>1,2,3</sup>, MA Yameng<sup>1,2,3</sup>, ZHU Likuan<sup>1,2,3</sup>, GUO Lixiang<sup>1,2,3</sup>, LIU Guangxue<sup>1,2,3</sup>, GUO Feng<sup>1,2,3</sup>, WANG Shoujing<sup>1,2,3</sup>

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;

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

**Abstract:** High purity quartz (HPQ), as a key basic material for strategic emerging industries, is essential to ensure the security of China's resource supply. In this paper, the pegmatite-type HPQ was selected as the research object, and then a whole chain survey and evaluation system for pegmatite-type HPQ was first established in China. This system included metallogenic prospect prediction, survey area delineation, accurate sample collection, sample pretreatment, deep beneficiation and impurity removal, deep chemical purification, and analysis of product. Moreover, the North Qinling region was chosen to proof of the concept. It was found that 11 pegmatite dikes could produce 4N level ( $\text{SiO}_2$  content  $\geq 99.99\%$ ), even 4N5 level ( $\text{SiO}_2$  content  $\geq 99.995\%$ ) of HPQ from 350 pegmatite dikes in this area. The methodological system realized the precise investigation and evaluation of the pegmatite-type HPQ, and the hierarchical evaluation according to the resource characteristics. More importantly, the development and utilization program and product application analysis for different veins were effectively established, which fully ensured that high quality resources were used in the terminal market. These findings would provide a reference for the mining discovery of HPQ, and strongly support the secure supply of key materials for the strategic emerging industries in China.

**Keywords:** pegmatite; high purity quartz; quartz ore deposit; whole chain evaluation system; North Qinling

引用格式: 张海敏, 张宏丽, 马亚梦, 朱黎宽, 郭理想, 刘广学, 郭峰, 王守敬. 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, ZHU Likuan, GUO Lixiang, LIU Guangxue, GUO Feng, WANG Shoujing. 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.

投稿网址: <http://hcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: [kebh@chinajournal.net.cn](mailto:kebh@chinajournal.net.cn)