

试论高纯石英原料矿的找矿方向

王登红¹⁾, 王 岩^{1)*}, 陈郑辉¹⁾, 黄 凡¹⁾, 杨 刚²⁾

1)中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2)中国建筑材料工业地质勘查中心, 北京 100035

摘 要: 高纯石英、高纯石英原料与高纯石英原料矿, 三者概念不同, 不能混淆。高纯石英是选矿之后的矿产品; 高纯石英原料是野外工作大致能判断的、可以作为高纯石英选矿原料的矿石; 而高纯石英原料矿是有可能从中圈定出高纯石英原料矿石、矿体的矿种, 包括石英砂、粉石英、石英砂岩、石英岩和脉石英矿 5 个主要矿种。当前我国寻找“高纯石英原料”的主要方向, 除了这 5 个矿种之外, 还要注意这 5 个矿种在特定条件下形成的矿床类型。比如, 稳定地台区形成的石英岩, 经过区域变质之后的石英岩矿; 变质石英岩风化之后的粉石英矿; 白岗岩、翁岗岩、碱性花岗岩建造风化壳以及由其风化产物形成的石英砂; “干环境”中形成的脉石英等。

关键词: 高纯石英; 高纯石英原料; 高纯石英原料矿; 找矿方向

中图分类号: P619.233 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2024.090901

Discussion on the Prospecting Direction of High-purity Quartz Deposit

WANG Denghong¹⁾, WANG Yan^{1)*}, CHEN Zhenghui¹⁾, HUANG Fan¹⁾, YANG Gang²⁾

1) MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) China National Geological Exploration Center of Building Materials Industry, Beijing 100035

Abstract: The concepts of high-purity quartz (HPQ), high-purity quartz ore and high-purity quartz deposit are different and should not be confused. HPQ is the mineral products after beneficiation; HPQ ore is the ore which can be identified roughly by field work and can be used as the raw materials of HPQ beneficiation; HPQ deposit is possible to delineate HPQ ore and ore body species, including quartz sand, powder quartz, quartz sandstone, quartzite and vein quartz 5 main minerals. At present, efforts are mainly directed toward finding HPQ ores, in addition to these 5 minerals, as well as identifying the types of deposits formed by these 5 minerals under specific conditions. For example, quartzite formed in stable platform areas, and quartzite deposits after regional metamorphism; powder quartz after weathering metamorphic quartzite; quartz sand formed from weathering crust of albitite, oncotite, and alkaline granite, and their weathering products; and vein quartz formed in the “dry environment”.

Key words: high-purity quartz(HPQ); high-purity quartz ore; high-purity quartz deposit; prospecting direction

1 从找矿的角度如何理解什么是“高纯石英”

迄今为止, 并无统一的高纯石英的“学术定义”, 也无政府出台的规章制度方面的“统一界定”。学术界有广义和狭义之区分, 政府方面与企业方面因为涉及方方面面的原因而很难统一界定什么是高纯

石英, 因而可能会先出台企业标准、行业标准, 再出台地质勘查规范等。对高纯石英纯度也尚无统一的标准, 国际上一般认为高纯石英是杂质含量小于 50 $\mu\text{g/g}$ 的石英(Harben, 2002), 国内则通常认为高纯石英是 SiO_2 含量大于 99.9% 的石英(韩宪景, 1987; 冉红想等, 2007; 汪灵等, 2014)。严格而言, 高纯石

本文由中国地质调查局“中国矿产地质志”项目(编号: DD20221695; DD20190379)、“战略新兴产业地质调查工程”项目(编号: DD20230034)和科技部科技基础资源调查专项“中国战略性新兴产业矿产资源数据整编及图集编纂”课题(编号: 2022FY101702)联合资助。

收稿日期: 2024-08-02; 改回日期: 2024-08-29; 网络首发日期: 2024-09-10。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 王登红, 男, 1967 年生。博士, 研究员。主要从事战略性矿产成矿规律及资源调查评价工作。E-mail: 847544588@qq.com。

*通信作者: 王岩, 女, 1983 年生。博士, 研究员。主要从事战略性矿产成矿规律研究及编图工作。E-mail: wangyan@mail.cgs.gov.cn。

英不是一种矿产,而是具有特殊质量要求的石英矿物,是由水晶、脉石英、石英岩、花岗伟晶岩等矿产作为原料经特定工艺提纯后的一种中间产品。按照我国当前的技术水平,高纯石英原料来源相对局限于水晶和脉石英两矿种,尚不能直接从石英岩和花岗伟晶岩中提纯(王九一, 2021)。

无论如何,没有明确的界定,对于地质找矿人员来说就难以“实操”,因为要找什么样的“矿”都不明确,又如何去采样、如何去圈定矿体、如何去探求资源储量呢?因此,有专家学者提出将“高纯石英”设立为“新矿种”。同样,要设为新矿种,就要制定相应的勘查规范,设立相应的边界品位、工业品位、最小开采厚度等基本参数,而目前所谓的 4N5、4N8(99.995%、99.998%)都是选矿之后的“纯度”,并不是平均品位或者工业品位。对于野外找矿来说,4N5、4N8 这样的指标不具现实可操作性,有点类似于宝玉石矿床。的确,透明度极高的水晶可能是“高纯石英”,但“透明度极高”就如同评价宝玉石“极其漂亮”一样,只是“感官”评价,具有鲜明的主观特点,而不是客观的“参数”。因此,要看“高纯石英”是否达到了 4N5、4N8 的“纯度”,还得到“超净实验室”采用“非常规”的分析测试技术才能测定,这对于野外地质找矿来说几乎不现实。何况,4N5、4N8 还是在采用“先进的选矿技术”处理之后的“纯度”,并不是原矿的、“装在样品袋子里的”地质样品中的 SiO_2 的含量!

也就是说,“高纯石英”本质上还是“石英”,是矿物,不等于“二氧化硅”。要找“高纯石英原料矿”只能从“石英矿物富集的地质体”中去找,而不是从“选矿车间”中去找,但 4N5、4N8 只能到“选矿车间”去找。野外比较接近于“高纯石英原料矿”者可能就是“水晶”了。无论是压电水晶、熔炼水晶,都曾经是“战略性关键非金属矿产”(王春连等, 2022),国家有关部门、有的省级地矿局为了找水晶矿还专门成立“水晶地质队”,只是人造水晶技术成熟之后,对天然水晶的找矿工作才停止,有的水晶矿后来也作为“观赏石”或“低档宝石”被开采,有的水晶矿产地则就地闭坑。

2 “高纯石英”野外评价的三大难题

除了通过科学研究圈定靶区、远景区等工作之外,到了“靶区”、“远景区”,野外找矿工作的关键一步,就是要“采集样品”。地质人员必须马上对什么样的地质样品属于“高纯石英”或者“高纯石英原料”作出快速、客观的判断,否则无法采样。即便是采了样,也可能“丢三落四”。而样品到了实验室之后,如何能得到 4N5 这样的分析测试

精度,则又是一道难题。即便是拿到实验室测试数据,野外又如何圈定矿体?因为野外的采样长度一般是 1 m 一个样,而 4N5 纯度的石英,几乎是不可能以 m 为尺度的。也就是 1 m 样长范围的石英能不能都达到 4N5 这样的纯度,如何保证?如果不能保证,则不能区分矿石类型,而矿体又如何圈定,资源量如何计算?即便是同一条石英脉,由于不同空间位置石英矿物本身的纯度及石英与其他矿物的组合是不同的,意味着石英单矿物中气液包裹体的含量、类型、大小等不会相同,杂质元素的种类及含量也不会相同。因此,野外找矿或者说对地质样品进行评价,以便于判断是否可以作为“高纯石英原料”提交给选矿车间以选出“高纯石英”,至少面临三大难题,一是测不准,二是定不准,三是用不准。测不准是指分析测试的精度,既包括地质队水平实验室的测试精度问题,也包括不同实验室之间的工作条件以及不同类型样品、不同目的测试工作所需要的精度、代表性、可操作性等问题。定不准,指的是对矿石类型的划分,野外靠肉眼区分“4N5 高纯石英”几乎是不可能的,野外定不准,采样就不可能采准。事实表明,并不是看起来越白的石英就是高纯石英,化学分析 SiO_2 并不高的样品也不见得就选不出“高纯石英”来。因此,采样采不准,矿体如何圈定就是个问题。用不准既包括样品在分析测试、地质研究方面的用途,也包括今后的工业用途。

从野外工作的角度,高纯石英本质上就是石英,可能达到 4N5 以上纯度的石英比较大的可能性来自于水晶和脉石英,因此,找矿的方向首先应该重视水晶和玻璃用石英原料矿。但这两种类型的水晶,能不能达到 4N5 这样的纯度,还需要考虑以下的因素:

(1)石英中的杂质及其赋存状态。一般石英中的杂质包括长石、云母、绿泥石等共伴生非金属矿物及磁铁矿、钛铁矿、金红石、锆石等各种金属副矿物,这些矿物可以通过破碎到一定粒度加以解离,而晶格杂质、固液相包裹体、晶体间隙杂质则由于其特殊的赋存状态,难以去除,也就成为石英能不能成为“高纯石英”的关键评价要素。①作为共伴生矿物,石英晶体间隙的杂质矿物通常包含长石、金红石、黑云母、白云母、黄铁矿、重晶石、锆石、独居石等(Götze, 2009),此外,石英晶体内部存在 $<2 \mu\text{m}$ 的微-纳米级裂隙和晶洞,其中充填有微-纳米级杂质微粒,如黏土、氧化铁、碳酸盐类矿物等。这些分布于石英颗粒之间的细小矿物,在肉眼鉴定时大致可识别,但也需要借助于光学显微镜才能准确鉴定,在选矿时相对易于去除。②即便是在光学显微镜下也难以识别的是晶格杂质,主要是 Al、Ti、

P、Li、Fe、Ge、B、K、羟基等以类质同像的方式替代 Si 原子(Götze, 2009; Müller et al., 2012)。当前可以利用原位分析测试的面扫描等技术来比较精确地识别这些杂质, 但分析测试的成本很高, 而且也不太具备大规模采样的条件。其中, 晶格中 Al 的含量对石英纯度和性能的影响最为重要。不同应用领域对晶格杂质元素的要求也不同。如, 高温灯管和光学领域要求提纯后的石英晶格 Al 含量小于 20×10^{-6} , 杂质元素总含量小于 30×10^{-6} ; 半导体制品要求的晶格 Al 含量更低, 小于 10×10^{-6} , 杂质元素总含量小于 15×10^{-6} ; 光伏产品要求 B 和 P 含量低于 1×10^{-6} ; 对于微电子行业, 特别是环氧模塑化合物(EMC), 要求放射性元素铀和钍的含量小于 2×10^{-9} (Haus et al., 2012)。显然, 要达到这样的质量控制精度, 已经不是野外地质工作——找矿阶段所能做到的了。一般认为, 要想将石英提纯为高纯石英, 12 种杂质元素(Al、K、Na、Li、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Cr、Ni、B)是必须加以精确地分析测定的。③气液包裹体, 既包括在一定温度、压力条件下呈一定形态的流体包裹体也包括赋存在包裹体中的子晶, 从化学成分的角度主要有 H_2O 、 CO_2 、 CO 、 H_2S 等气相、液相成分, 也包括硫酸根、碳酸根、氯离子及 Na、K、Ca、Mg 等阳离子。气液包裹体是造成石英透明度差的主要原因, 也是石英中碱金属和碱土金属杂质的主要来源。气液包裹体的类型、含量、大小及分布特征, 已经有了成熟的研究方法, 完全可以借助包裹体地球化学的研究方法来解决相关的评价问题。但也存在新的问题, 即, 传统或当代流体包裹体研究的往往是单个包裹体的原位分析及群体包裹体的成分、温度、压力等物理化学方面的特征, 而对其占石英矿物中的总质量分数方面的研究资料反而不多。在进行化学成分的分析时, 也往往是先破碎加工, 导致在样品加工的过程中部分包裹体先被破坏, 在样品烘干等过程中“失水”而导致最终数据失真。因此, 在对“高纯石英原料矿”进行地质、技术经济评价时, 必须全面、系统地对包裹体进行研究, 而不能只看化学分析的 SiO_2 的含量及微量元素的含量。

(2)石英的透明度。对于野外工作来说, 是不是透明——即石英的光学性质, 最为直观。毫无疑问, 无色、透明、油脂光泽也是石英有可能成为“高纯石英”的首要光学特征。尽管在实验室内利用光学显微镜可以观察到 Al、Fe、Mn、Ti 等杂质元素及晶格缺陷受激发后发出的色彩, 如 Al 导致蓝光、 Fe^{3+} 导致褐色、 Fe^{2+}/Mn 导致紫色等(Götze, 2009, 2012; Rusk, 2012; Sittner et al., 2018), 在电子显微镜下还可以观察到不同灰阶的阴极发光, 结合探针

分析可揭示晶格杂质元素的分布形式(如环带等), 在野外仍然可以借助透明度来判断其光学特征, 如将样品放在纸上观察字迹的清晰程度, 放在清水中观察其透明度等。

(3)石英的矿物形态和粒度。对于水晶来说, 其自形晶的形态特征明显, 其粒度也往往差别很大, 如江苏东海的水晶巨晶。对于脉石英中、变质成因石英岩中的石英颗粒, 则以近等粒状的、显微镜下具有三晶镶嵌结构(或三晶嵌结)的透明石英最值得系统采样进行深入评价。这是由于三晶嵌结结构代表的是高温高压下变质作用达到相平衡的状态, 此时的杂质(包括水气、固体杂质)得以有效排斥, 或者处于相分离状态, 有助于后续的选矿。因此, 即便是野外原矿的 SiO_2 的含量并不是那么高, 但只要后期的选矿成本能够降下来, 则变质成因的石英岩也不失为一个重要的找矿方向。印度的高纯石英有可能就来自于变质石英岩(王九一, 2024)。我国湖北蕲春灵虬山热液成因脉石英矿床, 被认为是由吕梁期花岗岩浆分异出的富含 SiO_2 的热液, 顺层理贯入太古宇大别山群红安组黑云母斜长片麻岩、花岗片麻岩和角闪岩中而形成的, 但也不排除变质成因而不是岩浆热液结晶分异的可能性。该矿区共见脉石英矿体 6 条, 产状与围岩一致, 以简单型脉为主, 矿石几乎全由石英组成, 粒径一般 1 mm, 部分大于 2 mm, 矿石化学成分 $SiO_2 > 99\%$, $Al_2O_3 < 0.3\%$, $Fe_2O_3 < 0.02\%$ (陈凌瑾, 2009)。

3 高纯石英与高纯石英原料、高纯石英原料矿

尽管对高纯石英、高纯石英原料、高纯石英原料矿三者的定义尚未形成共识, 会不会在形成统一概念之前又出现“人造水晶”技术突破一样, 在不久的将来出现“高纯石英”的替代品也是可能的, 当前经济技术条件下尤其是复杂的国际形势下, 加强对“高纯石英原料矿”的找矿工作确属迫在眉睫, 时不我待。

所谓的“高纯石英原料矿”指的就是石英砂、粉石英、石英岩、石英砂岩及脉石英这 5 个国家规定的独立矿种, 其地质特征、成因各不相同, 但都可以提供“石英”矿物原料, 也就是“高纯石英原料”的主要来源。“水晶”作为一个独立矿种, 自然而然也是高纯石英原料的主要来源。但自然界中的“水晶”本身量就很少, 难以达到大型规模, 而水晶本身的“观赏价值”独一无二, 其艺术价值不亚于工业价值, 虽然属于“低档宝石”, 也不宜用作工业用的“高纯石英”。也就是说, 野外能找到的、可用作“高纯石英原料”者主要来自于石英砂、粉石英、石英岩、石英砂岩和脉石英矿。这些“高

纯石英原料”经过选矿车间的加工,有可能获得天然形成的4N5、4N8或者纯度更高的“高纯石英”。我国水晶资源主要分布在四川、广西、贵州、黑龙江等地区,水晶矿产地205处,其中压电水晶99处、熔炼水晶100处、光学水晶3处、工艺水晶3处。2008—2017年十年间,我国水晶资源储量变化较小,在0.73万t左右,2018年保有资源量下降至0.66万t(章少华等,2015)。显然,即便是这些水晶全部得到开发利用,也是杯水车薪。

显而易见,当前条件下,要找到“高纯石英”,离不开“高纯石英原料”,而要找“高纯石英原料”应特别注意以下几个来源:①花岗伟晶岩中的石英块体,特别是石英核。这类伟晶岩一般是分异程度较高的花岗伟晶岩,其结晶粒度普遍较粗,多数呈块体结构,其中的共生或伴生矿物也较少,既有利于野外采集,更有利于进一步分选提纯。②粒度在1 mm以上的白岗岩和碱长花岗岩,其中Fe、Mn、Ti、Mg、Al等含量普遍较低,也应当是良好的高纯石英原料。③石英脉。石英脉分布非常广泛,但应强调老地层中变质成因石英脉和古生代以后岩浆分异成因的石英脉。④滨海石英砂矿。经过长期大浪淘沙,这类砂矿的石英纯度普遍较高。⑤水晶矿。应是比较理想的高纯石英原矿,但遗憾的是这类高

纯石英原料矿目前越来越少。从天然水晶中挑选出“高纯石英”的可能性比较大,但不太可能是工业化生产所需“高纯石英”的主要矿种。⑥石英岩,特别是老地层中的变质石英岩,其中SiO₂的含量普遍较高,是应注意的找矿方向。

4 当前优先考虑的找矿方向

本文所指高纯石英的找矿方向,指的是野外可操作的“高纯石英原料”的找矿方向,不是直接寻找“4N5”这样纯度的“高纯石英矿产品”。石英砂、粉石英、石英砂岩、石英岩和脉石英矿这5个矿种是我国法定的以石英为主要开发利用对象的矿种,共已发现矿产地2147处(刘小楼等,2025),其中,天然石英砂430处,石英砂岩684处,石英岩515处,粉石英36处,脉石英482处(图1)。当然,在勘探这类矿床时,并没有考虑当今所谓“高纯石英”的特殊需要,但其“石英原料”的本质属性没有变。因此,从这些已知的矿产地中优选出有可能提供“高纯石英原料”的矿产地,就是当前找矿的主要方向,也是最现实的工作方向。比如,江苏东海的水晶矿,也正是我国当前最重要的高纯石英原料的提供者。但由于其资源储量有限,不能满足需求,因此需要拓宽找矿方向。

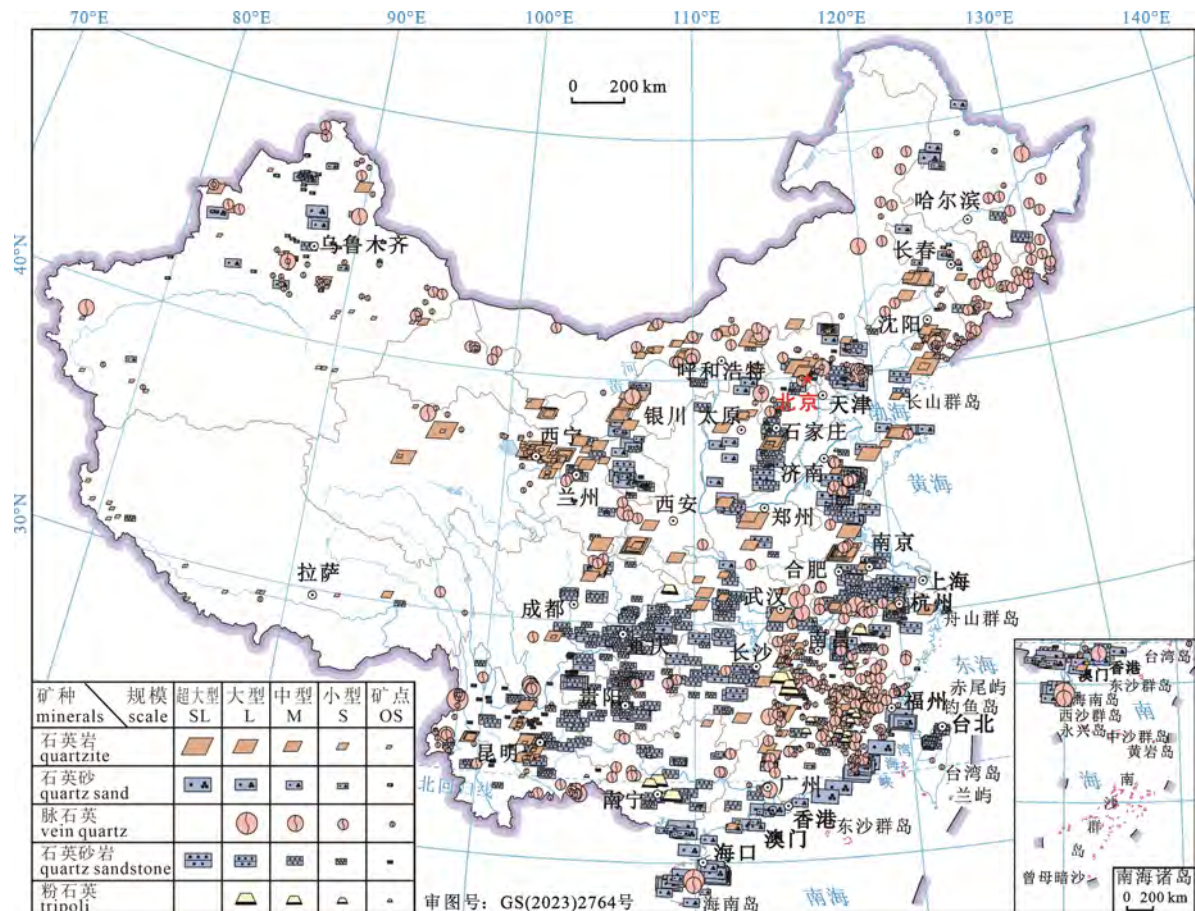


图1 中国可能用作高纯石英原料矿的石英矿产地分布简图

Fig. 1 Distribution of the quartz ore fields that may be used as high purity quartz deposit in China

(1)脉石英。东海水晶矿属于脉石英矿,定位于我国中央造山带的最东段,形成于印支运动的晚期,代表了相对稳定的成矿环境(王登红等, 2003)。造山带本身是构造活跃的,流体丰富且活跃,总体上不利于高纯石英的形成。但恰恰是在特定的相对稳定的时间、空间可以形成东海水晶这样的脉石英矿床。类似的远景区、靶区除了江苏北部、山东南部之外,在东秦岭一大别乃至西部的阿尔金、东昆仑、西昆仑都有找矿潜力。如青海的吴曼通洞。我国曾经根据工业用途的不同,将脉石英资源分为玻璃用、水泥配料用、冶金用脉石英等亚矿种。由于冶金用脉石英和水泥配料用脉石英 SiO_2 纯度低,主要用于冶金熔剂和水泥配料,不适宜用作高纯石英原料。玻璃用脉石英 SiO_2 含量相对较高,具有用作高纯石英原料的潜在价值。玻璃用脉石英分布于江西、四川、安徽、新疆、黑龙江、陕西、浙江等地的变质岩区,以中小型为主,大型矿 1 处,中型矿 14 处,小型矿 198 处(章少华等, 2015)。我国玻璃用脉石英保有资源储量 10 325.87 万 t, 其中基础储量 2 476.56 万 t, 资源量为 7 849.32 万 t(自然资源部, 2017)。尽管玻璃用脉石英的资源量不小,但 SiO_2 含量在 98.8%及以上(可满足我国当前提取高纯石英技术条件)的矿产地仅有 25 处,保有资源储量 709.9 万 t, 平均品位 99.07%(焦丽香, 2019)。即便是全部用作高纯石英原料,按照我国每年高纯石英砂约 600 万 t 的静态产能,也只能维持 10 多年的需要。

(2)石英砂。石英砂在我国的东南沿海分布广泛,在青海湖这样的内陆湖泊区也有产出,但类似于澳大利亚西海岸帕斯一带厚达数百米的滨海砂矿实属罕见。辽宁、山东等老变质岩分布区风化剥蚀出来的石英有可能在海边形成现代砂矿,海南、广东、福建等地的燕山期花岗岩及其他时代花岗岩分布广泛,其风化剥蚀出来的石英也可能搬运到海边形成石英砂矿。在风化剥蚀、搬运以及海浪千淘万漉的过程中,石英颗粒与其他矿物不断解离,有次生包裹体者也易于碎裂,有可能出现高纯石英。

(3)粉石英。粉石英一般指的是原生石英岩、脉石英或者花岗岩风化壳原地、近原地残积形成的现代砂矿,虽然可能混有长石、云母及金属重矿物,但其开发利用的成本相对较低,因而也是重要的找矿方向。实际上,老挝甘蒙省和波里坎赛省存在规模可达亿吨级的、质量好的粉石英矿层,就是风化壳型的。中国南方地区,气候湿润,风化作用强烈,具有成矿的优越条件。粉石英矿床的形成主要受层位和风化作用控制,粉石英常呈白色或灰白色,所以在找矿工作中应注意观察黏土层的颜色;传统粉

石英产区的找矿潜力仍然很大,如西南、中南和华东地区。

(4)石英岩。石英岩是由石英矿物为主形成的沉积岩(不包括由热液蚀变作用形成的“次生石英岩”),其原始成因可能是化学沉积的,也可以是机械沉积的,但石英矿物的含量一般在 90%以上。当其全岩的 SiO_2 含量达到 98%(野外地质样品)、等粒状变晶结构尤其是三晶嵌结结构发育、石英中流体包裹体不发育时,就应该作为重点评价对象。这种石英岩具有固定的层位,区域上展布规律清晰,有一定的体量,往往又有明显的野外找矿标志,无论是地质勘查还是今后的开发利用都具有现实可操作意义,应该引起重视。比如,我国东北的 BIF 铁矿矿集区,除了条带状铁矿发育之外,还有条带状的石英岩,由于经受过区域变质作用,石英颗粒发生重结晶或次生加大,流体包裹体及其他杂质在变质过程中被“纯化”,值得重视。以辽宁本溪铁矿外围的某石英岩矿为例,在 20 世纪 60 年代就作为玻璃原料用石英矿开采,单层厚度十多米,多层累计厚度上百米, SiO_2 平均含量在 98%以上,有的层位野外采样即达 99.0%。

根据实际生产情况,我国目前用作高纯石英原材料的脉石英和水晶,主要分布在秦岭一大别—苏鲁超高压变质带上,如湖北蕲春、安徽凤阳、江苏东海等高纯石英原料供应地。尽管这些地方的石英呈“脉状”产出,但其成因不见得是花岗岩岩浆结晶分异的,而更可能是变质侧分泌形成的。花岗伟晶岩也如此,即便是新疆阿尔泰地区十余个伟晶岩密集区的数万条伟晶岩脉,有的是变质成因,有的是岩浆结晶分异成因,有的是岩浆热液成因与变质成因的叠加(王登红等, 1998, 2002)。张晔等(2010)将新疆阿尔泰地区伟晶岩与美国斯普鲁斯潘花岗伟晶岩进行对比分析,发现具有高纯石英伟晶岩的特点,若进行严格的加工,很有可能得到高纯石英砂产品。但实际上具有相似性的恰恰是他们的伟晶岩都可能是过铝质花岗岩浆通过熔体-蒸汽高度分异作用的产物,产高纯石英的伟晶岩发育在片岩、片麻岩背景之上。

(5)石英砂岩。石英砂岩是以石英为主的沉积岩,但由于天然杂质多,开发利用成本高,如果其中的石英矿物本身纯度普遍不高,可不作为找矿重点。

此外,地台区形成的石英岩,经过区域变质之后的石英岩矿;变质石英岩风化之后的粉石英矿;白岗岩、翁岗岩、碱性花岗岩建造风化壳以及由其风化产物形成的石英砂;“干环境”中形成的脉石英等,均值得注意。

表 1 高纯石英矿床成因类型(据张佩聪等, 2012 修改)
Table 1 Genetic type of high-purity quartz (modified from ZHANG et al., 2012)

矿床成因	成因类型	矿床实例				
		地区	规模	石英品级	时代	成矿构造
花岗质岩浆石英长石共结结晶型	伟晶白岗岩高纯石英矿床	美国斯普鲁斯潘	特大型	Al 30、Al 20、 特产 Al 10	早古生代	阿巴拉契亚褶皱带
	热液脉石英型高纯石英矿床	湖北蕲春等地	小型	Al 30 为主, 少量 Al 20	燕山期(白垩纪)	华南地台及邻近活化区
岩浆热液析晶型	热液脉石英型高纯石英矿床 (无伴生同期金属矿化)	巴西中西带水晶	特大型	Al 30、Al 20	晚元古代	巴西滨海地盾(活化)
	金属矿床附带花岗伟晶岩型 高纯水晶矿床	巴西东带水晶	中型			
变质流体析晶型	变质流体伟晶岩-脉石英型 高纯石英矿床	江苏东海—赣榆水晶	小型	Al 30、Al 20	印支期(三叠纪)	大别—苏鲁超高压 变质带(东海段)
固相重结晶型	石英岩型高纯石英矿床	俄罗斯东萨彦岭	大型	Al 30、Al 20	早古生代	萨彦岭褶皱带

注: Al 30、Al 20、Al 10 分别表示晶格 Al 杂质元素含量为 $30\times10^{-6}\sim20\times10^{-6}$ 、 $<20\times10^{-6}\sim10\times10^{-6}$ 、 $<10\times10^{-6}$ 。

从矿床成因的角度, 高纯石英原料的类型包括花岗质岩浆石英长石共结结晶型、岩浆热液析晶型、变质流体析晶型、固体重结晶型、机械风化碎屑型(张佩聪等, 2012)(表 1)。

那么, 高纯石英原料矿到哪去找? 首先从矿床成矿系列的角度, 总体上分析研判哪些矿床成矿系列具备寻找高纯石英原料矿的可能性(程绍恒等, 2022), 再具体到不同矿床类型的远景区、靶区。

(1)对花岗伟晶岩, 目前看有利地区是新疆阿尔泰伟晶岩带、新疆阿尔金花岗伟晶岩带, 秦岭花岗伟晶岩带, 武夷山花岗伟晶岩带、祁连山花岗伟晶岩带, 幕阜山花岗伟晶岩区等应是今后值得关注的找矿地区。伟晶岩主要发育于下古生代或前寒武纪变质岩系中。伟晶岩中部的石英核可能是非常良好的高纯石英原料矿。

(2)对石英脉, 重点关注的地域是: ①在花岗伟晶岩外围的石英脉, 不仅石英脉的聚集程度较高, 其石英的纯度也普遍较高, 应是今后值得关注的地区。比如新疆阿尔泰和秦岭地区花岗伟晶岩带外围的石英脉。②古老地台或隆起区变质岩系中的石英脉, 应是值得关注的地区, 例如, 山西中阳县太古界吕梁山地区, 福建双溪前寒武纪隆起区, 湖北鄂东南付家山地区, 湖南城步青白口纪片岩中的石英脉。鲁西隆起带元古代地层中的石英脉等。今后应注意在这些地区找矿。③对岩浆分异型石英脉, 主要和中新世代中酸性岩浆侵入和后期分异作用有关的石英脉, 也是重要的找矿方向, 我国较有利地区主要有: 黑龙江小兴安岭—张广才岭地区, 云南滇西一带与燕山—喜马拉雅期花岗岩浆侵入活动中后期分异产生的石英脉, 西藏南部喜马拉雅浅色花岗岩和花岗伟晶岩带, 应是值得关注的地区。

(3)水晶矿, 自然也是重要的高纯石英原料矿。目前我国江苏东海一带地表的水晶矿已采得差不多

了, 但深部还是有前景的, 另外海南岛的水晶资源有很大前景, 值得进一步做工作。

(4)滨海石英砂矿, 我国福建、广东、特别是海南岛的石英砂矿也有很大前景, 石英砂的纯度较高, 值得进一步工作。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. DD20221695, DD20190379, and DD20230034), and Investigation of Technological Basic Resources (No. 2022FY101702).

参考文献:

陈凌瑾, 2009. 我国玻璃硅质原料矿床地质特征[J]. 中国非金属矿工业导刊, 76(S1): 7-9.

程绍恒, 李忠水, 于雷, 2022. 中国石英岩矿床成矿系列与成矿谱系初探[J]. 吉林地质, 41(2): 1-10.

韩宪景, 1998. 超高纯石英砂深加工生产[J]. 国外金属矿选矿, (7): 31-32.

焦丽香, 2019. 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, 135(2): 11-14.

刘小楼, 李忠水, 陈军元, 等, 2025. 中国矿产地质志·石英矿卷[M]. 北京: 地质出版社(出版中).

冉红想, 张振权, 2007. GCG 型干式电磁感应辊强磁选机在高纯石英砂生产中的应用[J]. 有色金属(选矿部分), (3): 43-46.

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.

王春连, 王九一, 游超, 等, 2022. 战略性非金属矿产厘定、关键应用和供需形势研究[J]. 地球学报, 43(3): 267-278.

王登红, 陈毓川, 李红阳, 等, 1998. 阿尔泰造山带地幔脱气的氦同位素研究[J]. 科学通报, 43(23): 2451-2453.

王登红, 陈毓川, 徐志刚, 等, 2002. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律研究[M]. 北京: 原子能出版社: 493.

王登红, 徐珏, 陈毓川, 等, 2003. 苏北榴辉岩中水晶的形成时代及其对超高压变质岩折返的示踪意义[J]. 地质学报, 77(4): 544-548.

王九一, 2021. 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, 40(1): 131-141.

- 王九一, 2024. 印度北部某 4N8 级高纯石英原料研究及其对我国的找矿启示[J/OL]. 岩石矿物学杂志, 1-19[2024-08-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.p.20240419.1901.002.html>.
- 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.
- 张晔, 陈培荣, 2010. 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, 16(4): 426-435.
- 章少华, 陶维屏, 2015. 中国矿产地质志·建材非金属矿卷(普及版)[M]. 北京: 地质出版社: 334.
- 自然资源部, 2017. 全国矿产资源储量通报[R]. 北京: 自然资源部.

References:

- CHEN Lingjin, 2009. Geological characteristics of glassy siliceous raw material deposits in China[J]. China Non-Metallic Mineral Industry Guide, 76(S1): 7-9(in Chinese).
- CHENG Shaoheng, LI Zhongshui, YU Lei, 2022. Preliminary study on metallogenic series and metallogenic pedigree of quartzite deposits in China[J]. Jilin Geology, 41(2): 1-10(in Chinese with English abstract).
- GÖTZE J, 2009. Chemistry, textures and physical properties of quartz-geological interpretation and technical application[J]. Mineralogical Magazine, 73(4): 645-671.
- GÖTZE J, 2012. Classification, mineralogy and industrial potential of SiO₂ minerals and rocks[C]//GÖTZE J, MÖCKEL R, Springer Geology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg: 1-27.
- HAN Xianjing, 1998. Ultra-high purity quartz sand deep processing production[J]. Foreign Metal Ore Dressing, (7): 31-32(in Chinese).
- HARBEN P W, 2002. The industrial mineral handybook—a guide to markets, specifications and prices, 4th edn[M]. London: Industrial Mineral Information: 412.
- HAUS R, PRINZ S, PRIESS C, 2012. Assessment of high purity quartz resources[C]//Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg: 29-51.
- JIAO Lixiang, 2019. Current situation and supply demand analysis of the development and utilization of vein quartz resources in China[J]. China Non-Metallic Minerals Industry, 135(2): 11-14(in Chinese with English abstract).
- LIU Xiaolou, LI Zhongshui, CHEN Junyuan, et al., 2025. Geology of mineral resources of China, volume of quartz ore[M]. Beijing: Geological Publishing House (in press)(in Chinese).
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 2017. National mineral resources reserves Bulletin[R]. Beijing: Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China(in Chinese with English abstract).
- MÜLLER A, WANVIK J E, IHLEN P M, 2012. Petrological and chemical characterisation of high-purity quartz deposits with examples from Norway[C]//GÖTZE J, MÖCKEL R. Springer Geology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg: 71-118.
- RAN Hongxiang, ZHANG Zhenquan, 2007. Application of GCG-type dry induced roller high-intensity electromagnetic separators in production of high grade quartz sand[J]. Non-ferrous Metals (Mineral Processing Section), (3): 43-46(in Chinese with English abstract).
- RUSK B, 2012. Cathodoluminescent textures and trace elements in hydrothermal quartz[C]//Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg: 307-329.
- SITTNER J, GÖTZE J, 2018. Cathodoluminescence (CL) characteristics of quartz from different metamorphic rocks within the Kaoko belt (Namibia)[J]. Minerals, 8(5): 190.
- WANG Chunlian, WANG Jiuyi, YOU Chao, et al., 2022. A study on strategic non-metallic mineral definition, key applications, and supply and demand situation[J]. Acta Geoscientia Sinica, 43(3): 267-278(in Chinese with English abstract).
- WANG Denghong, CHEN Yuchuan, LI Hongyang, et al., 1998. Helium isotope study of mantle degassing in Altai orogenic belt[J]. Science Bulletin, 43(23): 2451-2453(in Chinese with English abstract).
- WANG Denghong, CHEN Yuchuan, XU Zhigang, et al., 2002. Study on metallogenic series and metallogenic regularity in Altai metallogenic province[M]. Beijing: Atomic Energy Press: 493(in Chinese).
- WANG Denghong, XU Jue, CHEN Yuchuan, et al., 2003. Dating on the eclogite-hosted quartz crystal and its significance for tracing the exhumation of the UHP belt in north Jiangsu province[J]. Acta Geologica Sinica, 77(4): 544-548(in Chinese with English abstract).
- WANG Jiuyi, 2021. Global high purity quartz deposits: Resources distribution and exploitation status[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 40(1): 131-141(in Chinese with English abstract).
- WANG Jiuyi, 2024. Investigation on a 4N8 grade high purity quartz deposit from northern India: implications for ore prospecting in China[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1-19[2024-08-01]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1966.p.20240419.1901.002>(in Chinese with English abstract).
- WANG Ling, DANG Chenping, LI Caixia, et al., 2014. Technology of high-purity quartz in China: Status quo and prospect[J]. Earth Science Frontiers, 21(5): 267-273(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Peicong, LIU Xiufeng, LI Junfeng, et al., 2012. Study on high-purity quartz mineral resource engineering[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 32(2): 38-44(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Shaohua, TAO Weiping, 2015. Geology of mineral resources of China, volume of building materials and non-metallic minerals (Popular Edition)[M]. Beijing: Geological Publishing House: 334(in Chinese).
- ZHANG Ye, CHEN Peirong, 2010. 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, 16(4): 426-435(in Chinese with English abstract).