

高纯石英矿床的成因研究进展与找矿启示

赵睿^{1,2}, 高曦^{1,2*}, 孙丽静^{1,2}, 吴西顺^{1,2}

1. 中国地质调查局 地学文献中心, 北京 100083;

2. 中国地质图书馆, 北京 100083

[摘要] 高纯石英是半导体、光伏、光学等高新领域不可或缺的关键原料, 高纯石英用硅质原料是中国短缺的战略性矿物资源, 加强典型高纯石英资源禀赋、分布特征及成矿理论的对比研究, 对提升中国高纯石英找矿效率具有重要意义。本文选取美国斯普鲁斯派恩、俄罗斯克什特姆和布拉尔-萨尔德克等三个国外典型高纯石英矿床, 对各自代表的白岗岩-伟晶岩型、热液脉石英型和石英岩型高纯石英矿床的特征和成因机制进行总结和分析, 结合中国东秦岭、阿尔泰高纯石英矿床, 重点对影响白岗岩-伟晶岩型高纯石英成矿和品质的关键过程及控制因素进行讨论。总结认为(1)成岩阶段石英初始纯度较高、成岩后期变质变形作用对杂质进一步提纯和净化, 是高纯石英成矿的两个关键过程;(2)白岗岩和伟晶岩是花岗岩浆同源高分异的产物, 二者在成因机制和分布规律存在密切联系, 利用矿物组成、结晶温度、结构分带发育程度等特征可判断杂质含量进而作为找矿标志;(3)热液脉石英和石英岩在成岩阶段石英流体包裹体发育, 但后期经历强变形作用进一步纯化仍具备形成高纯石英矿的潜力;(4)硅质岩经历变质重结晶作用形成的石英岩, 可能是除白岗岩-伟晶岩型之外, 中国高纯石英用硅质原料未来重要找矿方向之一。

[关键词] 高纯石英; 白岗岩; 伟晶岩; 热液脉石英; 石英岩

[分类号] P622

[文献标志码] A

Genesis Research Advances and Prospecting Implications for High-Purity Quartz Deposits

ZHAO Rui^{1,2}, GAO Xi^{1,2*}, SUN Lijing^{1,2}, WU Xishun^{1,2}

1. Geoscience Documentation Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China;

2. China Geological Library, Beijing 100083, China

Abstract: High-purity quartz (HPQ) is an indispensable key raw material in high-tech fields such as semiconductors, photovoltaics, and optics. Siliceous raw materials for HPQ are strategic mineral resources in short supply in China. Strengthening comparative studies on the resource endowment, distribution characteristics, and metallogenic theories of typical HPQ is of great significance for improving the efficiency of HPQ prospecting in China. This paper selects

收稿日期: 2025-10-11; **改回日期:** 2025-12-19。 **责任编辑:**。

基金项目: 中国地质调查项目(DD20250208806)。

第一作者: 赵睿(1991—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 地球科学情报研究, E-mail: zhaorui.1117@gmail.com。

***通信作者:** 高曦(1989—), 男, 博士, 工程师, 研究方向: 地质科技战略情报研究, E-mail: gaoxi@mail.cgs.gov.cn。

引用格式: 赵睿, 高曦, 孙丽静, 等, 2025. 高纯石英矿床的成因研究进展与找矿启示[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 54(0): 1—17.

Zhao R, Gao X, Sun L J, et al., 2025. Genesis Research Advances and Prospecting Implications for High-Purity Quartz Deposits[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 54(0): 1—17.

three typical foreign HPQ deposits, namely Spruce Pine (USA), Kyshtym (Russia), and Bural-Sardyk (Russia). It summarizes and analyzes the deposit characteristics and metallogenic models of the alaskite-pegmatite type, hydrothermal vein quartz type, and quartzite type HPQ deposits represented by these three, respectively. In combination with HPQ deposits in East Qinling and Altay, it focuses on discussing the key processes and controlling factors that affect the mineralization and quality of alaskite-pegmatite type HPQ. The conclusions are summarized as follows: (1) The relatively high initial purity of quartz in the diagenetic stage, and the further purification and removal of impurities by metamorphic deformation in the late diagenetic stage are the two key processes for the metallogenesis of HPQ; (2) Alaskites and pegmatites are products of high differentiation of cogenetic granite magma, and there is a close relationship between them in genetic mechanism and distribution law. The impurity content can be judged by characteristics such as mineral composition, crystallization temperature, and the development degree of structural zoning, which can be used as prospecting indicators; (3) Quartz fluid inclusions are well-developed in hydrothermal vein quartz and quartzite during the diagenetic stage, but they still have the potential to form HPQ deposits after further purification by strong deformation in the later stage; (4) The quartzite formed by metamorphic recrystallization of siliceous rocks may be one of the important future prospecting directions for siliceous raw materials for high-purity quartz in China, in addition to the alaskite-pegmatite type.

Key words: high-purity quartz; alaskite; pegmatite; hydrothermal vein quartz; quartzite

高纯石英用硅质原料是世界稀缺、中国短缺的战略性矿物资源。高纯石英矿是指在当前技术经济条件下,经选矿提纯可获得 SiO_2 纯度 $\geq 99.995\%$ (4N5),且杂质、包裹体含量及粒度满足半导体、光伏、光学等高新领域要求的岩石(中国地质调查局, 2025)。目前,能够用作高纯石英原料的矿石类型主要有白岗岩、伟晶岩、热液脉石英、石英岩和天然水晶等(王九一, 2021; 汪灵, 2022; 吴福元等, 2025; 周浩阳, 2025; 王哲皓等, 2026),其中全球高纯石英原料供给主要来自美国斯普鲁斯派恩(Spruce Pine)(Swanson and Veal, 2010; 张晔和陈培荣, 2010; 王九一, 2021; 王哲皓等, 2025)和挪威蒂斯峡湾(Tysfjord)(Müller et al., 2022; Zhou et al., 2023; 周浩阳, 2025)等世界级优质白岗岩-伟晶岩型高纯石英矿床(图1);此类矿床具有规模大、品质优良且稳定等优点,是高端产品的主要原料,也是中国目前高纯石英找矿的主要方向。热液脉石英是目前中国最重要的高纯石英用硅质原料,此类矿床虽然分布广,但是产状变化大、矿床规模偏小,品质不稳定,尤其是岩浆热液成因气液包裹体含量非常高(唐春花等, 2023),因此限制了高端应用。石英岩矿床具有规模大、产状稳定、开采条件好等优势,因其沉积成因导致的杂质成分复杂,高纯度类型极为罕见(Fedorov et al., 2019)。天然水晶储量小、产状变化大、开采条件差、难以满足大规模工业

生产的需要,已退出高纯石英用硅质原料市场(汪灵, 2022; 唐春花等, 2023)。中国高纯石英资源地质找矿起步较晚,近年来虽然在河南东秦岭(张海啟等, 2022b; 郭峰等, 2024; 赵海波等, 2024a; 张驰等, 2024)、新疆阿尔泰(张晔和陈培荣, 2010; 张海啟等, 2022a)等地区的高纯石英调查评价、资源勘查、深度提纯、定向除杂等方面取得重要突破,但仍未实现规模化开发应用,无法满足高端应用需求。

高纯石英作为战略性资源,国外先进经验往往严格保护,但系统分析和借鉴这些经验对解决中国高纯石英“卡脖子”问题至关重要。中国在高纯石英资源分布特征、成矿理论、勘查开发先进经验等方面仍存在若干问题亟待解决,这些问题制约了中国高纯石英产业链发展和资源安全保障能力的提升。本文选取美国斯普鲁斯派恩白岗岩-伟晶岩型高纯石英矿床,并结合中国东秦岭、阿尔泰等研究热点区域,系统研究了该类型矿床的矿床特征和成矿模式,重点探讨了影响白岗岩-伟晶岩型高纯石英成矿过程与矿石品质的关键环节及控制因素。同时,针对中国研究程度相对薄弱的热液脉石英型与石英岩型高纯石英矿床,分别以俄罗斯克什特姆矿床、布拉尔-萨尔德克矿床为参照,总结了这两类矿床的成因机制。本研究旨在通过对典型高纯石英矿床的特征与成因展开系统性分析,为中国高纯石英



图 1 全球高纯石英原料矿床分布示意图

Fig. 1 Resource distribution of high-purity quartz deposits in the world

注: 澳大利亚糖袋山和克雷西克矿床本文未涉及, 资料来自王九一(2021)、吴福元等(2025)其余矿床资料来源详见本文相关内容及其参考文献

找矿工作提供切实有效的理论指导与科学参考。

1 白岗岩-伟晶岩型高纯石英矿床

1.1 斯普鲁斯派恩白岗岩-伟晶岩矿床特征及成因机制

白岗岩-伟晶岩型是高纯石英矿中最关键的类型, 具有规模大、品质优良且稳定等优点(张亮等, 2025; 吴福元等, 2025; 周浩阳, 2025), 也是中国目前高纯石英高端原料找矿方向聚焦所在。美国北卡罗来纳州的斯普鲁斯派恩矿山作为其典型代表, Hawkins 和 School House 两个在产矿山(图 2)一度为全球提供 90% 以上的半导体级高纯石英砂(王九一, 2021; 吴福元等, 2025)。因其石英晶格杂质含量极低, 且内部气液包裹体极少(图 3)(Gawel et al., 2021; Zhang et al., 2022), 由其开发的 IOTA 系列高纯石英产品也因此成为全球高纯石英砂高端产品标准, 故而是研究白岗岩-伟晶岩型高纯石英矿的典型范例。

斯普鲁斯派恩地区位于阿巴拉契亚造山带蓝岭段逆冲岩片, 经历了复杂的板块构造运动

(Hatcher et al., 2006; Levine et al., 2018)。在泥盆纪阿卡迪亚期(Acadian, 约 420~350 Ma), Rheric 洋盆闭合导致 Carolina 地体和 Avalon 地体碰撞拼贴(吴福元等, 2025; 郭宜琳等, 2025), 造成区域性剪切, 引发地壳减压熔融和大规模岩浆活动。斯普鲁斯派恩所在逆冲岩片西侧的边界断层既是岩浆上升的通道, 也为花岗岩和伟晶岩提供了就位空间(Hatcher et al., 2006; Levine et al., 2018)。

斯普鲁斯派恩地区的伟晶岩具有与花岗岩共生和穿切区域变质围岩两种产状。花岗岩-伟晶岩共生岩体整体呈粗粒结构, 多成白色或浅灰色, 平均矿物成分为斜长石(40%)、石英(25%)、钾长石(20%)、白云母(15%), 矿物组成上在花岗闪长岩和碱长花岗岩之间(吴福元等, 2025; 周浩阳, 2025)。伟晶岩占花岗岩体比例可达 50%(Swanson and Veal, 2010), 二者接触关系多样, 从截然的切割关系到完全渐变过渡均有出现, 后者表现为从花岗结构向伟晶结构的细微过渡, 反映了母岩浆发生原地分异, 伟晶岩浆运移距离有限的特征(吴福元等, 2025)。吴福元等(2025)认为, 这种

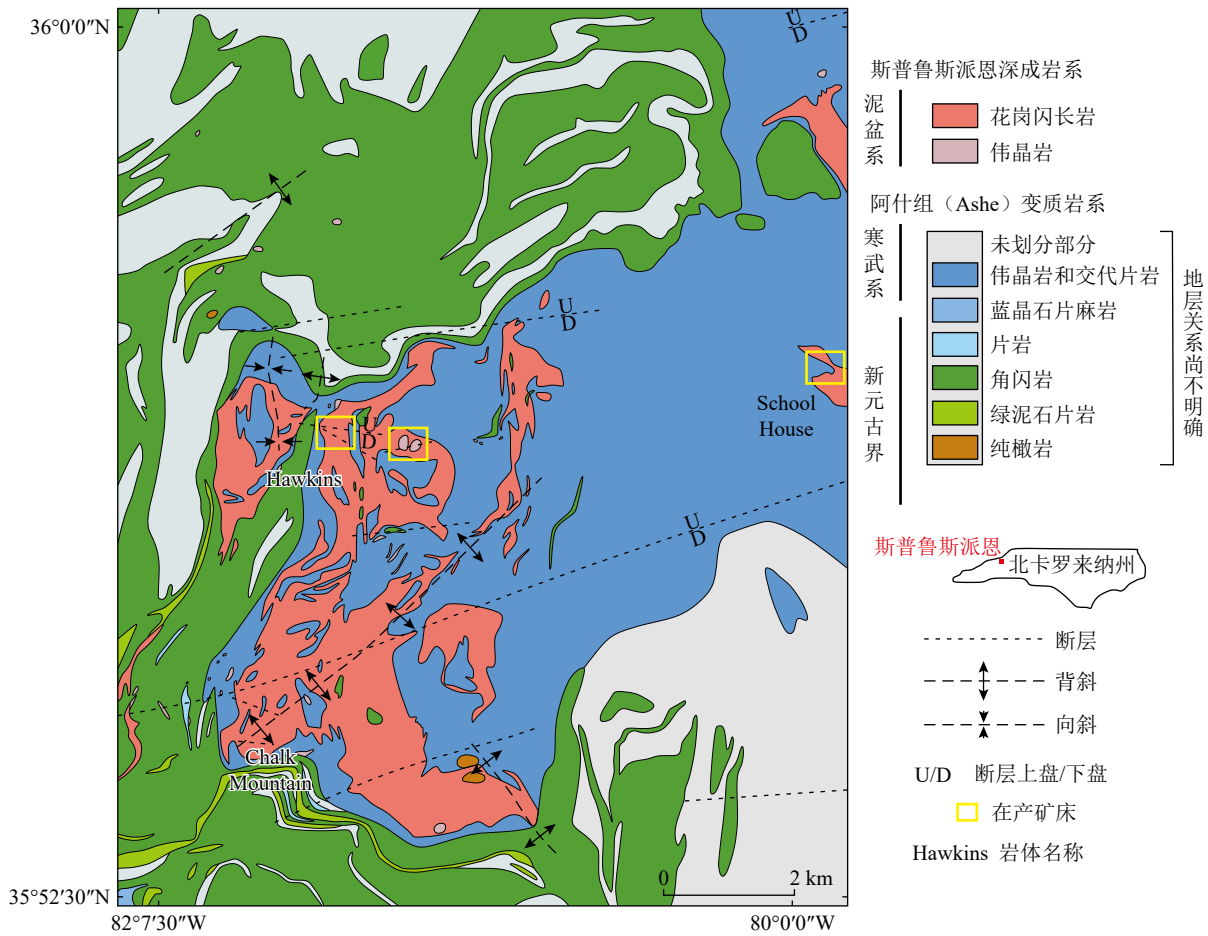


图 2 美国斯普鲁斯派恩地区地质图 (修改自 North Carolina Department of Quality, 2024)

Fig. 2 Geological Map of the Spruce Pine area, USA

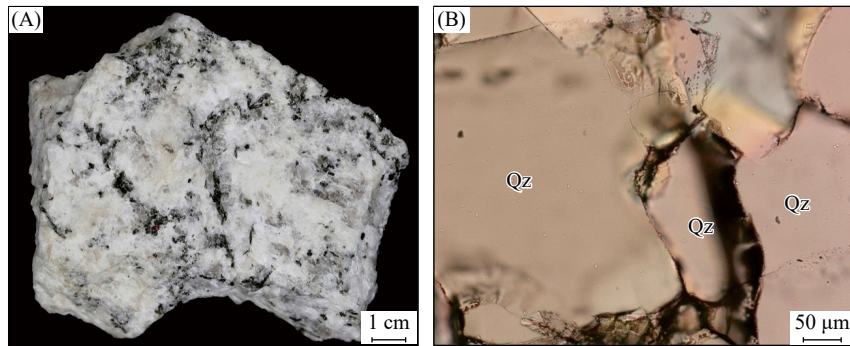


图 3 美国斯普鲁斯派恩白岗岩样品手标本和显微镜下照片

Fig. 3 Petrographic photo and microphotograph of alaskite sample, Spruce Pine, USA

(A) 白岗岩手标本整体呈浅色, 主要由碱性长石、斜长石、石英和白云母等组成 (修改自王哲皓等, 2025);

(B) 显微镜下照片显示其石英 (Qz) 颗粒纯净, 内部包裹体极少 (修改自 Zhang et al., 2023)

共生岩体中的伟晶岩是花岗岩体的重要组成部分, 两者矿物组成和成分以及全岩地球化学特征都十分相似, 是花岗岩浆“适度结晶分异作用”的产物, 应整体纳入花岗岩体系一并讨论。虽然其斜长石含量普遍多于钾长石的特征不符合白

岗岩 (alaskite) 的严格定义 (长石中 90% 以上为钾长石), 但本文延续了吴福元等 (2025) 和王建平等 (2025a) 将此类花岗岩和与其共生的伟晶岩统称为白岗岩的用法。

伟晶岩另一种产状是以岩脉或透镜体形式

大面积孤立产出在阿什组(Ashe Fm.)围岩的片岩和片麻岩中,其侵入方向多与区域片理平行,局部可见切割片理的现象。这些伟晶岩的矿物组成(长石、石英、白云母等)与白岗岩中的伟晶岩一致,多无分带,少数由石英核、文象花岗岩中间带和细粒边缘带构成简单分带,且常见单向凝固结构(如羽毛状白云母集合体)(Swanson and Veal, 2010)。这表明岩浆在压力驱动下,沿围岩的构造裂隙(如片理面或断裂)迁移并在浅部就位,挥发分的逃逸和压力降低进一步促进了矿物的粗大结晶。

斯普鲁斯派恩高纯石英原料矿主要来自该地区的白岗岩,小部分产自伟晶岩(吴福元等, 2025; 周浩阳, 2025)。斯普鲁斯派恩地区在阿卡迪亚期白岗岩和伟晶岩侵入结晶后(404~377 Ma),后期变质变形改造使已形成的岩石受定向压力作用,出现长石双晶弯曲,石英波状消光,以及“碎斑结构”,白云母在变形后呈现与围岩片理方向一致的定向排列(Swanson and Veal, 2010)。郭宜琳等(2025)研究认为,斯普鲁斯派恩地区后期构造变形通过位错蠕变和动态重结晶促进杂质从晶格排出、引发晶内微破裂形成流体包裹体容纳杂质避免进入晶格等两种方式对已成岩的石英进一步纯化,同时较低的应变速率、差异应力以及中等温度的变形条件抑制了杂质重新进入石英颗粒。然而,关于变质变形改造事件是阿卡迪亚期造山的持续影响还是后续 Theic 洋盆闭合导致的 Alleghanian 造山事件(330~260 Ma)的影响,目前仍存在争议(吴福元等, 2025)。

斯普鲁斯派恩白岗岩-伟晶岩型高纯石英矿床的形成过程可以概括为,大陆碰撞使区域收到强烈的构造挤压、地壳物质被深埋,温度和压力升高,导致地壳岩石发生部分熔融,形成花岗质岩浆,为白岗岩和伟晶岩的形成提供了初始物质来源。之后花岗岩浆分异演化使早期结晶矿物从岩浆中分离,残余岩浆逐渐富集硅、碱金属及挥发分,形成的白岗岩和伟晶岩中的石英初始纯度较高(郭宜琳等, 2025),后期变质变形改造促使石英进一步纯化,最终形成斯普鲁斯派恩高纯石英矿。

1.2 中国白岗岩-伟晶岩型高纯石英矿床

近年来,中国已在河南东秦岭、新疆阿勒泰等地区的白岗岩和伟晶岩中取得高纯石英找矿

突破,发现多处与斯普鲁斯派恩地区相同类型的高纯石英矿,并在岩石矿物学、地球化学、年代学特征方面具有相似特征。

东秦岭地区的白岗岩和伟晶岩发育受晚加里东一早海西期构造运动控制(李开文等, 2025; 王建平等, 2025a),早古生代花岗岩和深熔脉岩位于古元古界秦岭岩群、中一新元古界峡河岩群片岩、片麻岩中(张海啟等, 2022b),形成了以漂池岩体(496±4.2 Ma~452Ma)为代表的S型花岗岩(张成立等, 2013; 郭峰等, 2024; 张弛等, 2024; 吴福元等, 2025)和以灰池子岩体(462.8~421±27 Ma)为代表的I型花岗岩(王涛等, 2009; 刘丙祥, 2014; 郭峰等, 2024; 吴福元等, 2025)等。岩浆侵位后期形成富含挥发分且高度分异演化的岩浆热液,岩浆热液经过结晶分异作用形成石英中杂质极低的高纯石英矿。东秦岭地区目前报道的高纯石英主要产出在龙泉坪伟晶岩和漂池岩体白岗岩中(张海啟等, 2022b; 王建平等, 2025a; 吴福元等, 2025)。龙泉坪地区广泛分布的伟晶岩脉分带性完整,由外向内发育边缘带(含石榴石、电气石、绿柱石等花岗伟晶岩带)、外侧带(花岗结构石英长石带)、中间带(伟晶状石英长石带)以及核部带(块体石英带)(赵海波等, 2024a)。含高纯石英伟晶岩脉产于中间带,岩性为白云母花岗伟晶岩,主要矿物组成为钠长石(31%~51%)、石英(25%~38%)、微斜长石(11%~20%)、白云母(7%~9%)等,属过铝质、亚碱性岩石,具有稀土总量低且轻稀土富集特征,亏损高场强元素(如Ta、Nb、Ti)、富集大离子亲石元素(Rb、K、Th)(赵海波等, 2024a)。U-Pb定年测得龙泉坪10号矿点和5号矿点伟晶岩成岩年龄分别为406±0.8 Ma和420.2±2.2 Ma(赵海波等, 2024a),与灰池子岩体和区内各类伟晶岩时代(460~400 Ma)(吴福元等, 2025)以及区域角闪岩相变质年龄(425±5 Ma, 422±5 Ma)(郭峰等, 2024)基本一致或稍晚,为晚志留世一早泥盆世,稍早于斯普鲁斯派恩伟晶岩形成时代。漂池岩体位于灰池子岩体东部、龙泉坪地区东北部,岩体由北至南岩性变化较大,北侧为黑云母花岗岩,向东南变为二云母花岗岩,到岩体南侧变为白云母花岗岩,更南侧竹园沟一带还出现由花岗岩、细晶岩和伟晶岩组成的共生岩体(白岗岩)(王建平等, 2025a; 吴福元等, 2025)。李晓宇等(2025)分析漂池岩体白岗

岩主要矿物组成包括钾长石(35~40%)、斜长石(30~40%)、石英(21~25%)、白云母(3~5%),其中斜长石富钠,副矿物出现石榴子石;地球化学方面表现为强过铝质、高硅、高碱和强烈Eu负异常等高分异花岗岩特征;锆石定年结果显示与高纯石英相关的白岗岩形成年龄集中在425~405 Ma。

新疆阿尔泰库卫地区和青河地区的伟晶岩形成于晚古生代和中生代,围岩为中上奥陶统哈巴河群的变质片岩和片麻岩(张晔和陈培荣, 2010)。岩性有伟晶状含石榴子石白云母花岗岩、伟晶状白云母花岗岩、花岗质伟晶岩、中粒白云母花岗岩、中粗粒含电气石白云母花岗岩等。在矿物岩石学特征方面,样品主要由长石(微斜长石和钠长石, 55~60%)、石英(20~30%)和白云母(7~20%)组成。岩石地球化学特征方面,样品普遍具有亚碱性和弱到强过铝质的岩石化学特征,富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,稀土总量不高且轻稀土元素富集(张晔和陈培荣, 2010)。新疆阿尔泰琼库尔地体伟晶岩脉形成时代为晚二叠世—早三叠世,赋存于震旦系—下寒武统喀纳斯变质岩群中(裴国栋等, 2018; 张海啟等, 2022a),为地壳物质低程度部分熔融的产物(张海啟等, 2022a)。伟晶岩脉体结构简单,无明显的结构分带,岩性为白云母钠长伟晶岩,矿物主要由斜长石(55%~60%)、石英(20%~25%)、钾长石(5%~10%)和白云母(1%~5%)构成(张海啟等, 2022a)。

2 热液脉石英型和石英岩型高纯石英矿床

热液脉石英型矿床是中国开采较早的高纯石英矿床类型,以湖北蕲春灵虬山热液脉石英矿为代表(王九一, 2021)。热液脉石英型矿床虽然分布广,但其空间分布多呈脉状或鸡窝状,产状变化大、矿床规模偏小,品质不稳定(汪灵, 2022; 唐春花等, 2023; 张亮等, 2025)。更为重要的是,热液脉石英一般结晶温度较低,多含有大量气液包裹体,对石英加工提纯构成挑战(李开文等, 2025; 周浩阳, 2025; 吴福元等, 2025)。石英岩在地球岩石圈分布广泛,是石英砂岩或硅质岩经区域变质或热接触变质作用重结晶后形成产物,此类

矿床具有规模大、产状稳定、开采条件好等优势(汪灵, 2022; 张亮等, 2025),但其高纯度类型(杂质含量<0.1%)却极为罕见(Fedorov et al., 2019)。中国石英岩储量约为13.64亿吨(李作敏等, 2024),其矿床规模和资源量在中国石英资源中居首位,但主要为玻璃、冶金、化肥等低-中端应用,附加值不高。近年来,随着阿尔泰(张晔和陈培荣, 2010; 张海啟等, 2022a)、东秦岭(张海啟等, 2022b; 郭峰等, 2024; 张驰等, 2024; 王建平等, 2025a)等地区在高纯石英找矿领域取得重要突破,中国高纯石英高端原料的找矿热点已逐步从热液脉石英转向白岗岩-伟晶岩。然而,热液脉石英和石英岩作为高纯石英的重要矿石类型,在中国的高纯石英找矿领域,其潜力尚未被充分认知,实际价值也因此被显著低估。在全球,这两种类型矿石不仅是俄罗斯5N级高纯石英的核心原料(Belkovskiy, 2011; Nepomnyashchikh et al., 2023),更助力其在全球范围内打破了斯普鲁斯派恩伟晶岩型矿床的垄断格局,这对于中国拓展高纯石英找矿方向而言,具有重要的借鉴意义。

2.1 克什特姆(Kyshtym)热液脉石英矿床

南乌拉尔克什特姆(Kyshtym)粒状热液脉石英矿床是俄罗斯高纯石英的主力矿床,赋存于中—新元古界里菲阶(Riphean)乌法列伊(Ufaley)组变质杂岩系的混合岩化角闪岩片麻岩中(Korekina et al., 2024)。乌法列伊组原岩为大陆地壳裂谷构造岩浆建造,由火山岩和沉积岩组成:火山岩下部以变流纹岩为主,上部为变玄武岩与变流纹岩交替;沉积岩主要为石英岩和变泥质岩(Korekina et al., 2024)。晚古生代随东欧克拉通与哈萨克斯坦地块碰撞拼合,被卷入乌拉尔造山带,碰撞事件导致强烈的混合岩化、花岗岩侵入及构造剪切,形成现今的变质杂岩系(Korekina et al., 2024)。位于杂岩体东南部斯柳江卡-捷普洛戈尔斯克(Slyudyanka-Teplogorsk)构造带内的175号脉是克什特姆高纯石英原料的主矿体(图4),储量超过50万吨,以此矿脉开发的RQ-2K/1K型高纯石英产品的杂质含量 $\leq 10 \times 10^{-6}$ (Savichev and Krasil'nikov, 2020; Kuz'min, 2023)。

粒状热液脉石英构成了克什特姆矿床的核心资源,粒状石英因其颗粒状结构而得名,粒状结构是区域角闪岩相变质作用的直接产物(Polenov et al., 2017)。南乌拉尔地区有两期角闪岩相变质

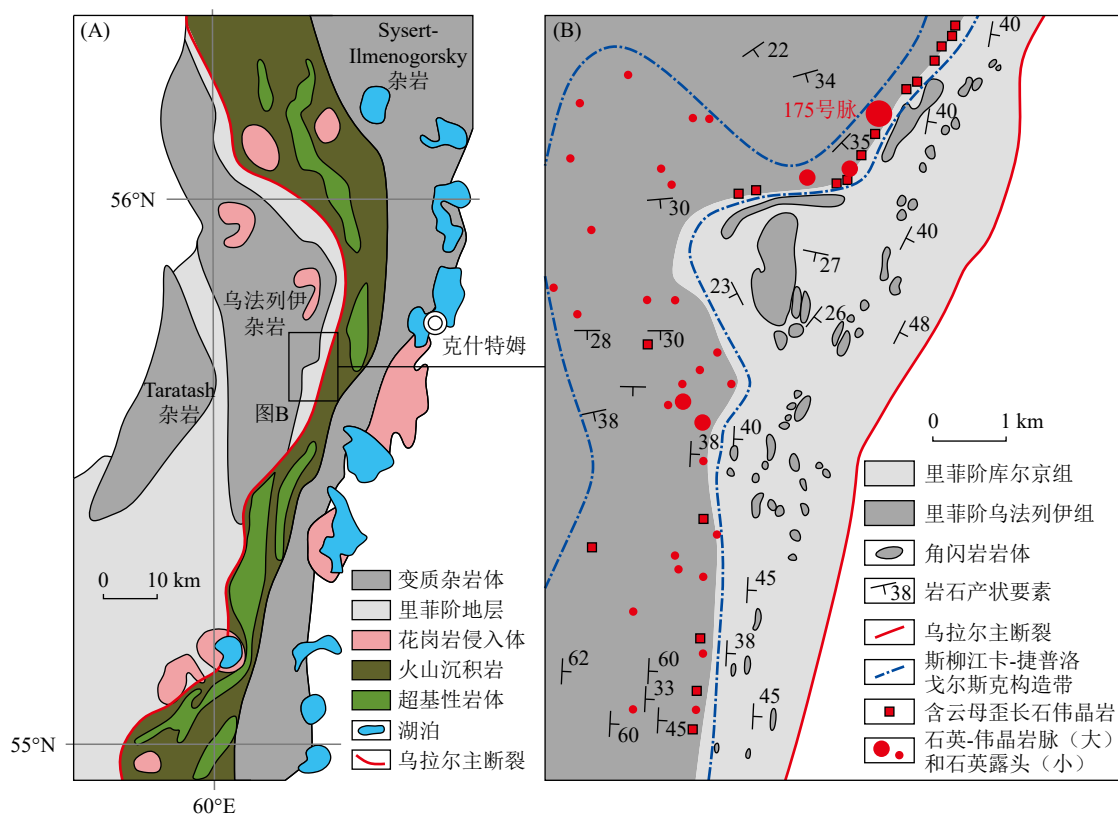


图 4 俄罗斯克什特姆地区乌法列伊变质杂岩东南部石英-伟晶岩脉分布及区域地质图

Fig. 4 Regional geological map and distribution of quartz-pegmatite veins in the southeastern part of the Ufaley metamorphic complex, Kyshtym region, Russia

(A) 乌法列伊变质杂岩区域地质图; (B) 乌法列伊杂岩东南部已勘探石英-伟晶岩脉、含云母伟晶岩的位置示意图

(修改自 Korekina et al., 2024)

作用 (Götze et al., 2017), 第一期晚寒武世阶段的角闪岩相(矽线石-铁铝榴石亚相)前进变质和退变质作用驱动硅质活化形成热液, 沿构造带运移并沉淀形成早期石英脉(图 5-A)。Götze et al. (2017) 指出克什特姆石英在这一阶段便具备较高纯度, 因为石英在此阶段结晶时形成了低本征结构缺陷(氧空位和硅空位含量低)的特征而避免了杂质进入, 大多数石英样品 $Al < 100 \times 10^{-6}$, Fe 和 Ti 均 $< 10 \times 10^{-6}$, 该地区极个别样品微量元素含量偏高也证实仅与微包裹体相关。第二期中古生代碰撞造山阶段的角闪岩相(十字石-石英亚相)变质作用, 对原生巨晶石英的初始交代结构进行改造, 通过位错迁移、亚颗粒旋转和边界迁移发生动态重结晶, 破碎为细-微粒状碎裂结构的均匀粒状集合体(图 5-B) (Polenov et al., 2017; Savichev and Krasilnikov, 2019), 变质条件下的重结晶、次生缺陷愈合或流体包裹体解体使石英的微观结构更均一, 阴极发光(CL)颜色从异质变为均匀,

Al、Li、Ti、Fe 等杂质元素含量降低, 经变形的石英样品中 $Al < 10 \times 10^{-6}$, $Ti < 2 \times 10^{-6}$, $Li \sim 1 \times 10^{-6}$ (Götze et al., 2017), 证实石英得到进一步纯化。克什特姆矿床同斯普鲁斯派恩矿床相似, 高纯石英成矿是初始纯度较高的石英经历后期变质作用进一步纯化的产物, 两期角闪岩相变质作用通过“物质活化-脉体形成-杂质剔除”的递进过程, 共同促成了克什特姆型粒状石英这一特殊类型高纯石英的形成。

2.2 布拉尔-萨尔德克 (Bural-Sardyk) 石英岩矿床

随着高质量石英原料需求的增长及石英矿床的枯竭, 俄罗斯迫切需要寻找和评估高纯度石英原料的新来源, 东萨彦山脉东南部的石英岩极具前景。东萨彦布拉尔-萨尔德克矿床的石英岩具有高度均一性和纯度, 提纯后杂质总量仅为 6.4×10^{-6} , 因此也称为“超石英岩”(superquartzites) (Belkovskiy, 2011)。超石英岩产于里菲阶伊尔库特组硅质碳酸盐序列, 后者以单斜形式不整合覆

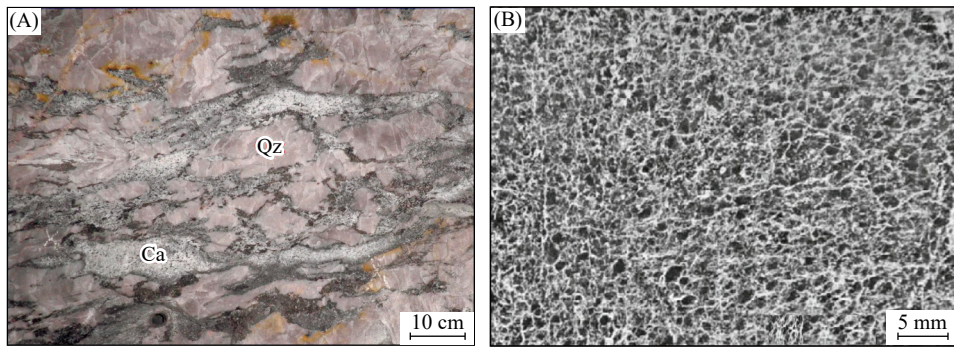


图 5 俄罗斯克什特姆热液脉石英矿床高纯石英照片

Fig. 5 Photographs of high-purity quartz from Kyshtym hydrothermal vein quartz deposit, Russia

(A)克什特姆 175 号矿脉矿壁照片(修改自 Savichev and Krasilnikov, 2019),脉体富含碳酸岩(Ca)残留体,完全包含在石英(Qz)基质中,反映早期石英脉是由碳酸岩形成后期的碱性热液驱动硅质活化、运移并沉淀;(B)粒状石英显微镜下照片(修改自 Savichev and Krasilnikov, 2019)

盖在 Gargan 块体新太古界花岗片麻岩基底之上(图 6-A 和图 6-D)(Fedorov et al., 2021)。硅质碳酸盐序列包括下部碳酸盐岩和上部石英岩,上部石英岩在布拉尔-萨尔德克矿床从下到上可见褪色和元素杂质贫化现象(图 6-A),岩石颜色由石墨形式的碳质物质含量决定,经测算,深灰色石英岩有机碳含量 ≥ 0.63 wt.%,向上到灰色石英岩约为 0.36 wt.%,再到顶部纯白色超石英岩 < 0.2 wt.%(Fedorov et al., 2021)。超石英岩的特征是杂质元素含量极低,几乎完全去除了着色的碳质物质,具斑状变晶结构,在细粒(< 0.2 mm)和中粒(1~2 mm)石英集合体的背景上,存在长达 3 mm 的透明无色拉长石英颗粒,亚平行定向排列(图 7)(Fedorov et al., 2021)。

超石英岩原岩为海相成因的硅质碳酸盐岩(1.25 Ga),其所在 Gargan 块体与相邻 Dunzhugur 岛弧碰撞(790 Ma)引发了一系列构造活动,如地壳挤压、褶皱变形和洋壳仰冲(Fedorov et al., 2019)。洋壳仰冲形成蛇绿岩层覆盖在硅质碳酸盐岩层之上,俯冲带则在 Gargan 块体下方引发花岗岩熔融并向上侵入盖层(图 6-B)。侵入体引发蛇绿岩层发生滑动(图 6-C 和图 6-D),滑动板片底部温压条件为 400~410 °C 和 2.5 kb,达到绿片岩相(Fedorov et al., 2019)。动力热变质作用导致下方硅质碳酸盐岩的流体组分重结晶和活化,并通过断层和薄弱带向下方低温压层位迁移,而顶部因更接近滑动层经历更彻底的重结晶,杂质被有效排出,最终在构造褶皱顶部形成近垂直的超石英岩体(图 6-A)。斑状变晶的定向特征是滑动过程

中动态应力作用下形成的,指示了蛇绿岩覆盖层的运动方向。

3 讨论

3.1 白岗岩-伟晶岩型高纯石英矿床的成因与找矿启示

综合对比美国斯普鲁斯派恩与中国东秦岭、阿尔泰白岗岩-伟晶岩型高纯石英矿床,对该类型矿床的典型共性特征及其形成原因总结和讨论如下。

(1)白岗岩与伟晶岩两种矿石类型存在成因关系,应整体讨论。由于花岗岩中通常含有黑云母等暗色矿物,导致石英中的 Ti 含量偏高而难以提纯,这一因素使得花岗岩类在过去一度被排除在高纯石英原料矿之外(张亮等, 2024)。早期一些学者按照伟晶岩的成因机制对斯普鲁斯派恩高纯石英矿床的开展研究,成功指导了阿尔泰、东秦岭龙泉坪地区伟晶岩型高纯石英的发现(张晔和陈培荣, 2010; 张海啟等, 2022a, b; 赵海波等, 2024a)。近年来,随着资料的丰富和研究的深入,关于斯普鲁斯派恩高纯石英原料的矿石类型取得了新的认识,即该地区高纯石英矿主要产自花岗岩-伟晶岩共生岩体(白岗岩)(吴福元等, 2025; 周浩阳, 2025)。斯普鲁斯派恩地区的白岗岩和伟晶岩是同源岩浆分异演化的产物,均来源于地壳熔融形成的 S 型花岗岩岩浆(Swanson and Veal, 2010; Levine et al., 2018),表现为过铝质、稀土总量低、轻稀土富集、富集大离子亲石元素、亏损高场强元素等特征(张晔和陈培荣, 2010)。通

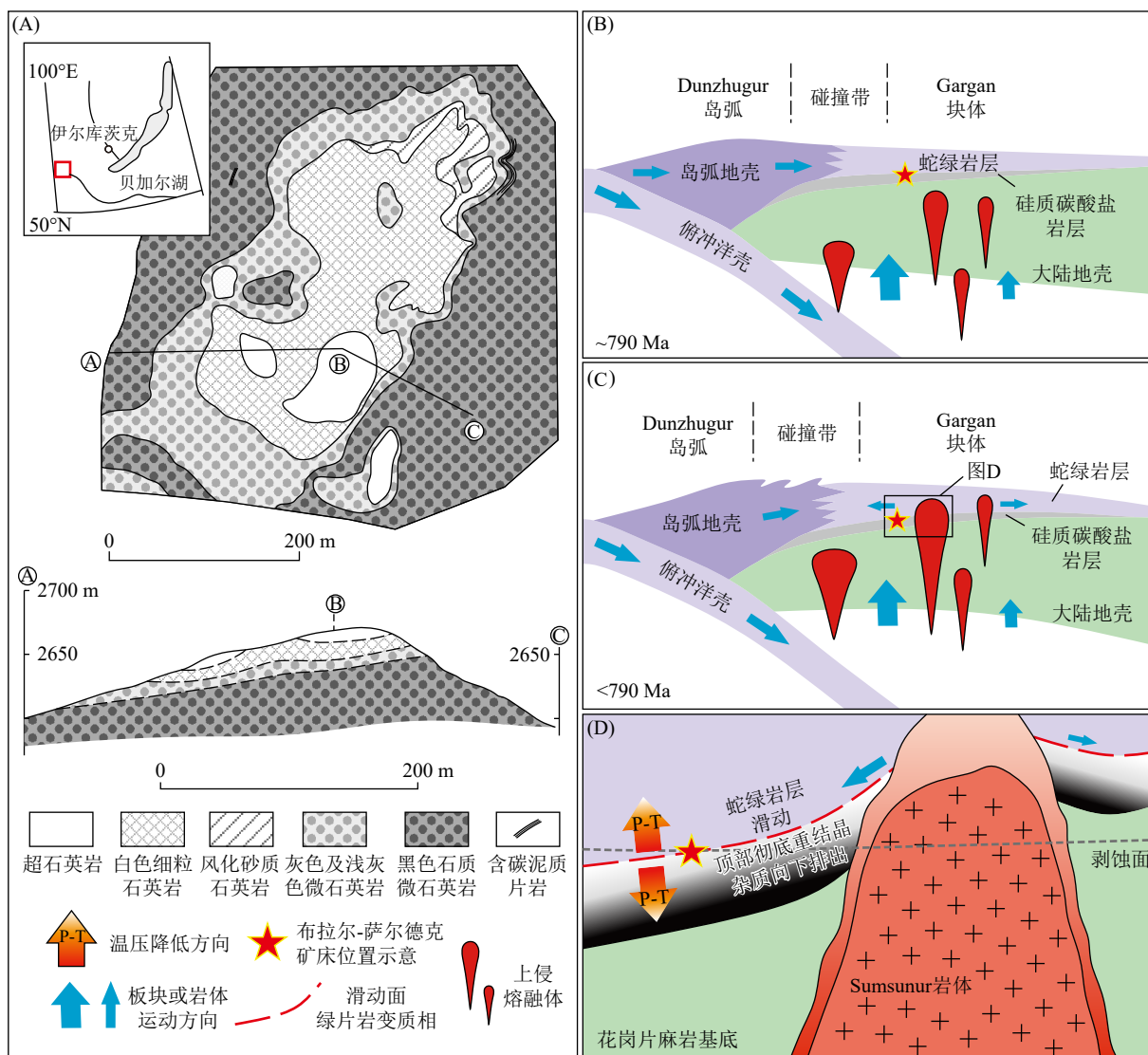


图 6 俄罗斯布拉尔-萨尔德克超石英岩矿床岩性平面分布图、剖面图及形成模式图

Fig. 6 Lithological planar distribution map, cross-section map, and schematic diagram of the formation process of the Bural-Sardyk superquartzites deposit, Russia

(A) 超石英岩矿床岩性平面分布图(上)及剖面图(下); (B) 约 790 Ma, Gargan 块体与相邻 Dunzhugur 岛弧碰撞引发下方花岗岩熔融并上侵; (C) 若岩浆侵入上覆硅质碳酸盐岩和蛇绿岩盖层, 引发蛇绿岩层滑动; (D) 滑动面产生的动力热变质作用使下方硅质碳酸盐岩流体组分重结晶和活化, 杂质向下排出, 顶部形成杂质极少的超石英岩

(修改自 Fedorov et al., 2019)

过 U-Pb 定年测得花岗质深成杂岩的结晶年龄为 377.7 ± 2.5 Ma (Chalk Mountain 岩体, Miller et al., 2006, 位置见图 2), 与利用全岩 Rb-Sr 和锆石 U-Pb 测年计算的白岗岩和伟晶岩侵入年龄 (404~377 Ma) 一致 (Swanson and Veal, 2010)。Goldberg and Dallmeyer (1997) 计算出斯普鲁斯派恩花岗岩体侵位时围岩处在温度范围为 640~705 °C 的角闪岩相变质作用, 围岩中变质矿物 (如石榴子石、角闪石) 的同位素年代学分析和温压条件测算结

果显示其角闪岩相变质作用的高峰期年龄为 390~370 Ma (Swanson and Veal, 2010), 表明三者同为阿卡迪亚造山期构造-热事件驱动的产物。王建平等 (2025a) 结合斯普鲁斯派恩花岗岩-伟晶岩紧密共生的特征, 将东秦岭漂池岩体发现的白云母花岗岩-伟晶岩-细晶岩共生岩体统称为白岗岩, 并在资源调查评价后证实其为高纯石英原料矿石。吴福元等 (2025) 认为白岗岩型高纯石英矿位于花岗岩体顶部高分异花岗岩与伟晶

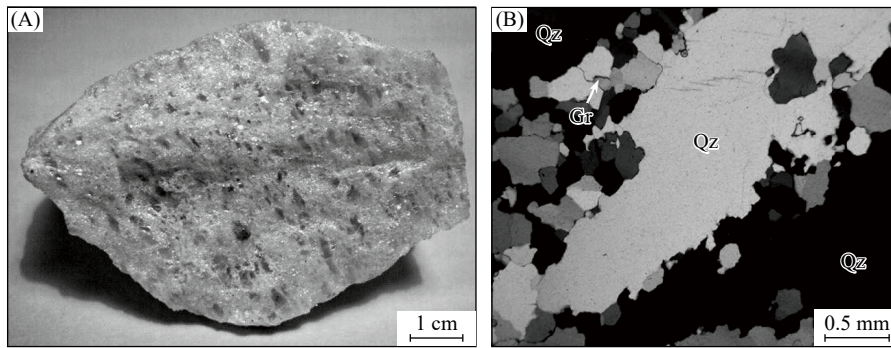


图 7 俄罗斯布拉尔-萨尔德克石英岩矿床高纯石英照片

Fig. 7 Photographs of high-purity quartz from Bural-Sardyk quartzite deposit, Russia

(A) 布拉尔-萨尔德克超石英岩样品手标本照片, 在细粒基质背景上, 有近平行定向的透明石英颗粒, 其长轴尺寸 1~4 mm (修改自 [Nepomnyashchikh et al., 2018](#)); (B) 显微镜下照片 (正交偏光) 显示石英 (Qz) 斑晶之间基质为显晶质石英颗粒 (0.3~1 mm), 颗粒间隙含极少量石墨 (Gr) (修改自 [Fedorov et al., 2019](#))

岩的共生部位, 并提出在伟晶岩发育区寻找高分异花岗岩作为找矿指标。虽然目前学术界逐渐将白岗岩和伟晶岩划分为两种独立的高纯石英矿石类型, 但通过对比斯普鲁斯派恩和东秦岭高纯石英矿床特征和成因机制, 作者认为, 这两种矿石类型在成因和分布规律上联系紧密, 应作为一个整体讨论。以东秦岭地区为例, 首先, 东秦岭龙泉坪伟晶岩和漂池岩体白岗岩形成时代一致 ([赵海波等, 2024a](#); [李晓宇等, 2025](#)); 其次, 锆石 Hf 同位素分析结果显示龙泉坪伟晶岩和与灰池子岩体没有直接成因联系 ([徐进鸿等, 2025](#)), 而是与漂池岩体南侧白云母花岗岩同样来自来源于古老地壳物质 (秦岭群) 的部分熔融 ([李晓宇等, 2025](#))。黑云母花岗岩-二云母花岗岩-白云母花岗岩-贫矿白云母伟晶岩为一个岩浆分异程度逐渐增强的连续演化序列 ([吴福元等, 2025](#); [王建平等, 2025b](#); [李晓宇等, 2025](#))。作为高纯石英原料矿的伟晶岩无论是与花岗岩共生 (例如漂池岩体白岗岩), 还是独立侵入围岩 (例如龙泉坪伟晶岩), 都是属于同一岩浆系统连续分异的产物 (来源于秦岭群部分熔融)。将两种类型矿石一并讨论, 有助于高纯石英矿床特征和成因机制的理解, 这也是为什么早期按照伟晶岩思路利用斯普鲁斯派矿床案例指导中国伟晶岩型高纯石英矿床研究取得成功的原因。需要说明的是, 这一认识是在斯普鲁斯派恩和东秦岭两个地区的白岗岩型和伟晶岩型高纯石英矿床资料基础上取得的, 其他地区如阿尔泰, [张晔和陈培荣 \(2010\)](#) 选取的样品为伟晶状白云母花岗岩和花岗质伟

晶岩, 虽然资料有限, 但不排除同样是白岗岩和伟晶岩两种矿石类型的组合; 挪威蒂斯峡湾地区作为目前公认质量最优的花岗伟晶岩型高纯石英产地, 广泛出露花岗片麻岩 ([Müller et al., 2022](#); [Zhou et al., 2023](#)), 尚未发现与该岩石类型相关的高纯石英报道, 故在此不作讨论。

(2) 白岗岩-伟晶岩型高纯石英矿发育在古老的片岩、片麻岩背景之上, 与古生代花岗质岩浆活动关系密切。斯普鲁斯派恩和东秦岭地区为泥盆纪白岗岩-伟晶岩侵入前寒武系变质岩系, 阿尔泰地区为晚古生代和中生代伟晶岩侵入早古生界变质岩系。挪威蒂斯峡湾伟晶岩形成于新元古代并侵入古元古代花岗岩, 二者在 430 Ma 年左右的加里东造山运动期间经历角闪岩相变质作用和变形分别形成变伟晶岩和花岗片麻岩 ([Müller et al., 2022](#); [Zhou et al., 2023](#))。片岩和片麻岩是区域绿片岩相-角闪岩相变质作用的典型产物, 主要与地壳深部构造活动, 如板块碰撞、俯冲或大陆造山运动引发的大范围变质作用相关, 伴随强烈的温度、压力升高和流体活动。斯普鲁斯派恩白岗岩-伟晶岩侵位时, 阿什组围岩处于角闪岩相变质作用峰值; 龙泉坪伟晶岩与区域角闪岩同样具有相似的成岩年龄和温压条件 ([郭峰等, 2024](#)); 蒂斯峡湾变伟晶岩则是角闪岩相变质作用的直接结果。结合劳伦大陆与冈瓦纳大陆碰撞拼接、华北板块与扬子板块碰撞拼接的构造背景, 认为地壳深部构造活动引发的岩浆活动为白岗岩-伟晶岩型高纯石英矿的形成提供了物质基础; 而石英结晶后经历的区

域绿片岩相-角闪岩相变质变形作用则可以对石英进一步纯化(周浩阳, 2025; 吴福元等, 2025; 郭宜琳等, 2025)。值得注意的是,喜马拉雅造山带广泛出露始新世-渐新世高分异成因的淡色花岗岩(Cao et al., 2022),其中位于特提斯喜马拉雅构造板片雅拉香波穹窿中的冬不真岩体主体岩性是始新世似斑状二云母花岗岩,和围岩一同经历550~650℃的低角闪岩相变质作用,发生强烈变形具片麻理构造(刘志超等, 2025)。这种同样由高分异演化和后期变质变形改造共同形成的冬不真淡色花岗岩中的石英纯度极高,杂质元素总含量仅为 $18 \times 10^{-6} \sim 32 \times 10^{-6}$,具有较高的高纯石英成矿潜力(刘志超等, 2025)。

(3)矿物组成方面,几个地区的白岗岩-伟晶岩样品除石英外,普遍以钠长石、微斜长石和白云母等花岗质岩浆高度分异产物为主要成岩矿物(赵海波等, 2024a; 吴福元等, 2025; 李晓宇等, 2025)。在花岗质岩浆分异演化后期,钠交代(钠化)作用是一个关键的驱动因素,其根本原因是 Na^+ 作为不相容元素在后期流体中浓度的不断升高。钠化作用结果的一方面是,斜长石系列中 Ca^{2+} 逐渐被 Na^+ 取代,形成富钠端元的钠长石,钠长石还会在钾长石(微斜长石)冷却过程中出溶形成交生体(条纹长石)。张正伟等(2025)提出,钠长石和石英共生时,会先于石英吸收熔体中四次配位的 $[\text{AlO}_4]^{5-}$,从而降低石英晶格中的Al浓度,而且,钠化作用会使流体/熔体系统酸性减弱,而Al溶解度与系统酸度正相关,因而不利于Al进入石英晶格。钠化作用的另一个结果是,钾长石系列的正长石和微斜长石与富 Na^+ 流体反应转化为钠微斜长石,被取代出的 K^+ 进入流体后与挥发分(如 H_2O)及铝硅酸盐组分发生水化反应生成白云母,同时过剩的 SiO_2 结晶为石英,这种交代作用的石英晶格中Ti和Al元素杂质含量相对较低(张正伟等, 2025)。因此,钠长石是白岗岩-伟晶岩型高纯石英矿的标志矿物,其代表的钠化作用是岩浆高度分异的关键驱动因素,对高纯石英杂质含量的降低具有重要影响。另外,我们还发现几个白岗岩-伟晶岩型高纯石英矿样品中,石英的含量都在25%左右(张海啟等, 2022a; 赵海波等, 2024a; 吴福元等, 2025; 李晓宇等, 2025),这一含量可能是岩浆分异达到某种程度的标志,该程度时石英与伴生矿物中的杂质含量达到了

平衡,但能否作为高纯石英找矿标志还需要进一步研究。

(4)矿物温度计约束了白岗岩-伟晶岩冷却过程中锆石、长石、黑云母、石英等矿物形成的温度范围,与高温至低温冷却过程中矿物的结晶序列对应。其中,全岩Zr饱和温度代表的岩浆初始结晶温度,普遍与围岩的区域角闪岩相变质温度一致,例如斯普鲁斯派恩伟晶岩中Zr饱和温度为526~796℃(赵海波等, 2024a),围岩阿什组变质岩系峰期变质阶段温度为640~705℃(Miller et al., 2006),还有挪威南部Evje-Iveland(郭峰等, 2024)和东秦岭等,反映白岗岩-伟晶岩形成和区域变质是同一区域构造-热事件的驱动结果。随着结晶的进行,温度逐渐降低,Swanson and Veal(2010)通过长石(包括斜长石和钾长石)温压计重建P-T轨迹,估算了斯普鲁斯派恩地区长石和云母等主要矿物大规模结晶的温度约为600℃。石英是晚期低温阶段结晶产物,Zhang et al.(2022)利用石英Ti含量温度计(TitaniQ)计算了斯普鲁斯派恩伟晶岩中石英的结晶温度为405~438℃,东秦岭龙泉坪伟晶岩中石英的结晶温度为431~462℃。温度变化制约高纯石英中某些敏感元素的含量,研究表明,400℃左右形成的石英矿物中Al元素含量要比300℃左右低两个数量级(赵海波等, 2024b);而石英矿物中Ti元素含量随结晶温度升高而快速升高,温度超过650℃时,石英矿物中Ti元素含量 $\geq 31 \times 10^{-6}$ (赵海波等, 2024a),因此石英形成后过高的变质温度(如麻粒岩相)可能使Ti重新进入石英晶格,不利于高纯石英的形成。这些温度数据为理解花岗岩浆分异以及高纯石英成矿过程提供了热力学依据。

(5)白岗岩和伟晶岩型高纯石英矿结构分带发育程度差异显著,影响高纯石英原料矿品质。斯普鲁斯派恩和东秦岭漂池岩体白岗岩中的伟晶岩与花岗岩是共生关系,与经典伟晶岩具有良好分带的特征存在明显区别(吴福元等, 2025),不发育分带;斯普鲁斯派恩分布于围岩中的伟晶岩脉分带特征不明显、少数具有简单分带(Swanson and Veal, 2010; 吴福元等, 2025);东秦岭龙泉坪伟晶岩脉分带性较为明显(赵海波等, 2024a; 吴福元等, 2025);挪威蒂斯峡湾发育高纯石英的古元古代伟晶岩受变质作用影响,其原始内部分带遭到破坏,新发育分带以巨大石英核部带为特征

(周浩阳, 2025)。伟晶岩脉的结构分带发育程度与结晶分异程度正相关: 分异越充分, 矿物按结晶顺序的空间分异就越明显, 分带结构也越复杂。全分异伟晶岩的结构分带由外到内可划分为边缘带、文象带、微斜长石块体带、钠长石块体带和石英核(张正伟等, 2025)。经典理论认为, 源于花岗质残余熔体的伟晶岩会围绕花岗母岩分布, 而随着与母岩体空间距离的增加, 伟晶岩熔体的分异演化程度会提高(Linnen et al., 2012)。距离母岩体越远, 伟晶岩中石英的 Al、Li、B 和 Ge 等杂质含量越高(周浩阳, 2025), 同时伟晶岩分带也越明显, 不同分带的石英杂质含量分布差异显著, 且通常越靠近伟晶岩核部杂质越高(Müller et al., 2022; 周浩阳, 2025)。因此, 远离花岗岩体的伟晶岩规模较大、分带性较好但不适宜作为高纯石英原料矿, 例如, 龙泉坪伟晶岩石英杂质含量受结构分带影响而不确定性较大, 造成矿石品质不稳定(李开文等, 2025)。吴福元等(2025)提出, 靠近花岗岩体的伟晶岩规模较小、分带性不明显但石英成分稳定, 是高纯石英矿的潜在目标。目前的资料表明, 白岗岩型原料矿的石英品质优于伟晶岩型(吴福元等, 2025; 李开文等, 2025)。斯普鲁斯派恩产于白岗岩原料矿的高纯石英砂达 5N 级, 而产自围岩中伟晶岩原料矿的高纯石英砂品质达 4N8 级(吴福元等, 2025); 东秦岭漂池岩体白岗岩可稳定制备 4N8 级高纯石英砂(王建平等, 2025a), 龙泉坪伟晶岩只有很少一部分能达到 4N8 级原料矿要求(李开文等, 2025); 值得注意的是, 张海啟等(2022a)报道阿尔泰地区经提纯后可获得 4N8 级的高纯石英样品取自没有明显分带的伟晶岩, 结合张晔和陈培荣(2010)报道的岩石类型, 推断该地区可能同时分布白岗岩型和伟晶岩型高纯石英原料矿, 未来需进一步研究。可以确定的是, 白岗岩、靠近白岗岩规模较小分带不明显的伟晶岩、远离白岗岩规模较大分带明显的伟晶岩中的石英品质依次降低。

3.2 热液脉石英型和石英岩型高纯石英矿床的成因与找矿启示

热液脉石英的矿物组成极为单一, 几乎全由石英构成, 天然热液脉石英中 SiO_2 的质量分数通常可达 99.9% 以上(汪灵, 2022)。然而, 由于热液脉石英以流体成因为主, 导致其矿石中普遍存

在包裹体和金属离子等杂质, 尤其是岩浆热液成因气液包裹体含量非常高(唐春花等, 2023), 这对高纯石英在各类工业场景中的应用造成了较大不利影响(汪灵, 2022)。热液脉石英虽然是中国目前最重要的高纯石英用硅质原料, 但受其矿床规模、开采成本、包裹体含量等因素限制, 一直难以满足高端应用的需求, 另外作为代表的湖北蕲春灵虬山热液脉石英矿床, 经过多年开发资源也基本开采殆尽(邹本利等, 2025)。变质成因的石英岩杂质含量则因原岩而异, 例如, 化学沉积或生物成因的硅质岩与石英砂岩同样是沉积成因原岩, 但硅质岩杂质更少, 变质后更容易形成高纯度石英岩, 例如由化学成因硅质岩变质形成的布拉尔-萨尔德克超石英岩(Fedorov et al., 2021)。中国尚无石英岩矿作为高纯石英用硅质原料开发的相关报道。国内需求以及世界范围内斯普鲁斯派恩矿床垄断地位的影响, 驱动中国高纯石英找矿重心向白岗岩-伟晶岩类型转移。

高纯石英典型找矿案例综合研究表明, 高纯石英原料矿的品质受石英结晶时的流体性质和结晶后的后期改造共同影响(Swanson and Veal, 2010; Götze et al., 2017; Fedorov et al., 2019; 张正伟等, 2025; 郭宜琳等, 2025)。岩浆高度分异演化形成的白岗岩-伟晶岩中石英的初始纯度较高(郭宜琳等, 2025), 因此是高纯石英成矿潜力最大的矿床类型(周浩阳, 2025); 热液脉石英和石英岩形成温度较低, 两种类型中石英的流体包裹体较为发育(吴福元等, 2025), 和白岗岩-伟晶岩相比缺乏“先天优势”。但前述斯普鲁斯派恩、克什特姆、布拉尔-萨尔德克等地区高纯石英成因机制表明, 尽管变质变形条件有所差异, 白岗岩、伟晶岩、热液脉石英和石英岩等不同类型矿石中的石英都可以进一步提纯。需要注意的是, 斯普鲁斯派恩的后期变质变形主要通过位错蠕变、动态重结晶以及晶内微破裂形成次生包裹体等机制排出杂质, 是较低应变速率和差异应力以及中等温度的低应变体系(郭宜琳等, 2025); 而克什特姆和布拉尔-萨尔德克的后期变质变形通过亚颗粒旋转、晶格缺陷愈合以及流体包裹体分解等方式排出杂质, 是机械变形与重结晶作用强烈的强变形体系。俄罗斯克什特姆热液脉石英和布拉尔-萨尔德克石英岩两个矿床产出杂质含量极低的高纯石英, 证明了经历强变形作用

的热液脉石英和石英岩能够通过“后天发力”从而形成高纯石英原料。虽然理论上可行,但高品质热液脉石英和石英岩型高纯石英原料在世界范围内产出十分有限:作为中国进口主要来源之一的印度北部石英岩型原料纯度达 4N8,但 Ti、Fe 和 Ca 含量较高,只能按照 4N5 级别用于光伏行业(王九一, 2025; 吴福元等, 2025);挪威发育的蓝晶石石英岩杂质含量和流体包裹体含量较低,但是脉石矿物难以剔除,且石英粒度较小(100~1 000 μm),尚未被利用(周浩阳, 2025);挪威内索登矿(Nesodden)热液脉石英资源量大且后备资源相当丰富,但流体包裹体含量较多, Li 含量较高,目前尚未开采(吴福元等, 2025)。近年中国陕西安康(田冲等, 2022)、江西华云(周渝等, 2023)、湖南仁里(陈虎等, 2025)、东秦岭徐家湾和铜山(李开文等, 2025)等地热液脉石英,皖南皮园村组(徐波等, 2023)、贺兰山黄旗口组(杨凡燕等, 2023)、江西遂川(熊宽等, 2024)、湖北神农架三堆河(邹本利等, 2025)石英岩都有产出高纯度石英样品的相关报道,虽然还未达到开发利用标准,但这两种类型矿床仍是除白岗岩-伟晶岩型之外中国高纯石英找矿的潜力方向。石英岩中石英含量明显高于其他几类矿石,因此制备高纯石英砂成本相对较低,而且其本身作为变质岩,变质重结晶过程更容易形成杂质相对较低的石英,特别是化学成因或生物沉积的硅质岩经历变质重结晶和强变形作用形成的石英岩,可能是中国高纯石英用硅质原料未来重要找矿方向之一。

4 结论

(1)本研究分析了美国斯普鲁斯派恩白岗岩和伟晶岩型、俄罗斯克什特姆热液脉石英型和布拉尔-萨尔德克石英岩型高纯石英矿床的特征与成因机制,结果表明,成岩阶段石英初始纯度较高、成岩后期变质变形作用对杂质进一步提纯和净化,是高纯石英成矿的两个关键过程。

(2)白岗岩和伟晶岩由花岗质岩浆同源高度分异产生,在成因和分布规律上联系紧密,应整体讨论。矿物组成、结晶温度以及结构分带发育程度等特征可作为白岗岩-伟晶岩型高纯石英矿床的找矿标志。

(3)热液脉石英和石英岩两种类型岩石受流

体包裹体发育等影响,高品质高纯石英矿床在世界范围内产出有限。硅质岩经历变质重结晶和强变形作用形成的石英岩,可能是除白岗岩-伟晶岩型之外,中国高纯石英用硅质原料未来重要找矿方向之一。

利益冲突声明: 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

作者贡献声明: 赵睿负责论文构思、研究方法和论文写作;高曦参与研究框架设计和核心文献筛选;孙丽静、吴西顺参与文稿修改与内容审校。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

[参 考 文 献]

- 陈虎,周芳春,柳清琦,等, 2025. 湖南仁里矿床高纯石英原料矿资源评价[J]. 中国地质调查, 12(1): 40—48.
- Chen H, Zhou F C, Liu Q Q, et al., 2025. Resource evaluation of high-purity quartz raw material minerals in Renli deposit of Hunan Province[J]. Geological Survey of China, 12(1): 40—48. (in Chinese)
- 郭峰,朱黎宽,李建国,等, 2024. 北秦岭龙泉坪伟晶岩型高纯石英矿床黑云母成分特征及地质意义[J]. 矿物岩石, 44(4): 71—82.
- Guo F, Zhu L K, Li J G, et al., 2024. Biotite composition characteristics and geological significance of Longquanping pegmatitic type high purity quartz deposit in North Qinling Mountains[J]. Mineralogy and Petrology, 44(4): 71—82. (in Chinese)
- 郭宜琳,褚杨,夏冉然,等, 2025. 美国 Spruce Pine 地区高纯石英原矿岩石变形研究[J]. 岩石学报, 41(10): 3469—3489.
- Guo Y L, Chu Y, Xia R R, et al., 2025. Deformation characteristics of the high-purity quartz bearing rocks in the spruce pine area, USA[J]. Acta Petrologica Sinica, 41(10): 3469—3489. (in Chinese)
- 李开文,王建平,张正伟,等, 2025. 东秦岭高纯石英矿主要类型、分布规律和找矿方向[J]. 岩石学报, 41(10): 3321—3339.
- Li K W, Wang J P, Zhang Z W, et al., 2025. Main types, distribution patterns, and prospecting targets of high-purity quartz deposits in East Qinling, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 41(10): 3321—3339. (in Chinese)
- 李晓宇,王建平,胡天杨,等, 2025. 东秦岭漂池复式花岗岩成因及其对高纯石英成矿的启示[J]. 岩石学报, 41(10): 3340—3358.
- Li X Y, Wang J P, Hu T Y, et al., 2025. Petrogenesis of the Piaochi composite granite in East Qinling and its implications for high-purity quartz mineralization[J]. Acta Petrologica Sinica, 41(10): 3340—3358. (in Chinese)

- 李作敏, 谭秀民, 张亮, 等, 2024. 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, 44(2): 115—123.
- Li Z M, Tan X M, Zhang L, et al., 2024. Utilization characteristics and application progress of quartz resources[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 44(2): 115—123. (in Chinese)
- 刘丙祥, 2014. 北秦岭地体东段岩浆作用与地壳演化[D]. 合肥: 中国科学技术大学.
- Liu B X, 2014. Magmatism and crustal evolution in the eastern North Qinling Terrain[D]. Hefei: University of Science and Technology of China. (in Chinese)
- 刘志超, 王佳敏, 蓝廷广, 等, 2025. 马拉雅淡色花岗岩及相关岩石高纯石英成矿潜力与找矿方向[J]. 岩石学报, 41(10): 3394—3414.
- Liu Z C, Wang J M, Lan T G, et al., 2025. The potential for high-purity quartz mineralization and the exploration direction of the Himalayan leucogranites and associated rocks[J]. Acta Petrologica Sinica, 41(10): 3394—3414. (in Chinese)
- 裴国栋, 弓小平, 马华东, 等, 2018. 阿尔泰造山带喀纳斯群变质岩地球化学特征及形成环境[J]. 中国地质, 45(1): 141—154.
- Pei G D, Gong X P, Ma H D, et al., 2018. Geochemical characteristics and formation environments of metamorphic rocks in the Kanas Group of Altay tectonic belt[J]. Geology in China, 45(1): 141—154. (in Chinese)
- 唐春花, 楼法生, 潘家永, 等, 2023. 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), 46(5): 437—445.
- Tang C H, Lou F S, Pan J Y, et al., 2023. 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), 46(5): 437—445. (in Chinese)
- 田冲, 寿立永, 崔拥军, 等, 2022. 南秦岭安康地区高纯石英用脉石英矿特征及质量影响因素[J]. 岩石矿物学杂志, 41(6): 1147—1158.
- Tian C, Shou L Y, Cui Y J, et al., 2022. Characteristics and quality influencing factors of vein quartz deposit for high-purity quartz in Ankang area, South Qinling Mountains[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 41(6): 1147—1158. (in Chinese)
- 王建平, 李开文, 张正伟, 等, 2025a. 东秦岭白岗岩型高纯石英原料矿的发现、研究与意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 43(2): 448—452.
- 王建平, 左鹏飞, 张正伟, 等, 2025b. 岩浆高分异演化控制高纯石英矿床形成的机制与研究展望[J]. 岩石学报, 41(10): 3278—3288.
- Wang J P, Zuo P F, Zhang Z W, et al., 2025b. Mechanisms and prospects: magmatic fractionation and the formation of high-purity quartz deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 41(10): 3278—3288. (in Chinese)
- 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.
- Wang J Y, 2021. Global high purity quartz deposits: resources distribution and exploitation status[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 40(1): 131—141. (in Chinese)
- 王九一, 2025. 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]. 岩石矿物学杂志, 44(1): 152—166.
- Wang J Y, 2025. Investigation on a 4N8 grade high purity quartz deposit from northern India: Implications for ore prospecting in China[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 44(1): 152—166. (in Chinese)
- 汪灵, 2022. 高纯石英的概念及其原料品级划分[J]. 矿产保护与利用, 42(5): 55—63.
- Wang L, 2022. Concept of high purity quartz and classification of its raw materials[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 42(5): 55—63. (in Chinese)
- 王涛, 王晓霞, 田伟, 等, 2009. 北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的启示[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39(7): 949—971.
- Wang T, Wang X X, Tian W, et al., 2009. North Qinling Paleozoic granite associations and their variation in space and time: implications for orogenic processes in the orogens of central China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 52(9): 1359—1384.
- 王哲皓, 汤建, 汪灵, 等, 2026. 中国超白玻璃用低铁石英砂的矿物材料学特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 53: 1—11.
- Wang Z H, Tang J, Wang L, et al., 2026. Mineral material science characteristics of low iron quartz sand for ultra-clear glass in China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 53: 1—11. (in Chinese)
- 王哲皓, 奚旺, 汪灵, 2025. 美国 Spruce Pine 地区花岗伟晶岩高纯石英优质原料的矿物材料学特征[J]. 矿物岩石, 45(1): 106—116.
- Wang Z H, Xi W, Wang L, 2025. The mineral material characteristics of high-purity quartz raw materials from the granite pegmatite in the Spruce Pine Area, USA[J]. Mineralogy and Petrology, 45(1): 106—116. (in Chinese)
- 吴福元, 刘小驰, 王佳敏, 等, 2025. 高分异花岗岩与高纯石英[J]. 岩石学报, 41(10): 3243—3277.
- Wu F Y, Liu X C, Wang J M, et al., 2025. Highly fractionated granite and high-purity quartz[J]. Acta Petrologica Sinica, 41(10): 3243—3277. (in Chinese)
- 熊宽, 方平, 张永忠, 2024. 江西石英岩资源分布特征及成矿规律研究[J]. 矿产勘查, 15(11): 2115—2123.
- Xiong K, Fang P, Zhang Y Z, 2024. Research on the distribution and mineralization laws of quartzite resources in Jiangxi[J]. Mineral Exploration, 15(11): 2115—2123. (in Chinese)
- 徐波, 蔡晓兵, 魏国辉, 2023. 皖南地区石英岩型高纯石英原料

- 矿的发现及其意义[C]//第十届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会. 西安:中国矿物岩石地球化学学会矿床地球化学专业委员会.
- 徐进鸿, 吴承泉, 张正伟, 等, 2025. 东秦岭龙泉坪花岗伟晶岩结构分带与高纯石英成矿关系研究: 来自矿物学、年代学和地球化学约束[J]. 岩石学报, 41(10): 3373—3393.
- Xu J H, Wu C Q, Zhang Z W, et al., 2025. Structural zoning and high-purity quartz of granitic pegmatite from the Longquanping area in the East Qinling: constraints from mineralogy, chronology, and geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 41(10): 3373—3393. (in Chinese)
- 杨凡燕, 李黎明, 薛俊辉, 等, 2023. 高纯石英原料的选择、评价及提纯潜力研究——以贺兰山黄旗口组为例[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 44(1): 53—60.
- Yang F Y, Li L M, Xue J H, et al., 2023. Selection, evaluation and purification potential of high purity quartz raw materials—Taking Huangqikou Fm of Helan mountains as an example[J]. *Journal of Ningxia University (Natural Science Edition)*, 44(1): 53—60. (in Chinese)
- 张成立, 刘良, 王涛, 等, 2013. 北秦岭早古生代大陆碰撞过程中的花岗岩浆作用[J]. 科学通报, 58(23): 2323—2329.
- Zhang C L, Liu L, Wang T, et al., 2013. Granitic magmatism related to early Paleozoic continental collision in North Qinling[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(35): 4405—4410.
- 张驰, 张智慧, 陈少伟, 等, 2024. 豫西卢氏南部含高纯石英花岗岩伟晶岩岩石地球化学特征研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, (1): 20—26.
- Zhang C, Zhang Z H, Chen S W, et al., 2024. Research on geochemical characteristics of granite pegmatite containing highpurity quartz, in the Southern Lushi County, west of Henan Province[J]. *China Non-Metallic Mining Industry*, (1): 20—26. (in Chinese)
- 张海敏, 谭秀民, 马亚梦, 等, 2022a. 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, 42(5): 1—7.
- Zhang H Q, Tan X M, Ma Y M, et al., 2022a. Geological characteristics of pegmatite-type high purity quartz in Altay, Xinjiang and preparation technology of 4N8 grade products[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 42(5): 1—7. (in Chinese)
- 张海敏, 朱黎宽, 赵海波, 等, 2022b. 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, 42(4): 153—158.
- Zhang H Q, Zhu L K, Zhao H B, et al., 2022b. 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*, 42(4): 153—158. (in Chinese)
- 张亮, 刘磊, 朱黎宽, 等, 2024. 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, 40(4): 1311—1326.
- Zhang L, Liu L, Zhu L K, et al., 2024. Discussion on the geological evaluation for high purity quartz raw material[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 40(4): 1311—1326. (in Chinese)
- 张亮, 朱黎宽, 李建国, 等, 2025. 我国高纯石英资源勘查发现现状及思考[J]. 中国矿业, 34(7): 8—17.
- Zhang L, Zhu L K, Li J G, et al., 2025. The situation and thoughts on the exploration and development of high-purity quartz resources in China[J]. *China Mining Magazine*, 34(7): 8—17. (in Chinese)
- 张晔, 陈培荣, 2010. 美国 Spruce Pine 与新疆阿尔泰地区高纯石英伟晶岩的对比研究[J]. 高校地质学报, 16(4): 426—435.
- Zhang Y, Chen P R, 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)
- 张正伟, 王建平, 吴承泉, 等, 2025. 高纯石英的地质含义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 44(4): 872—887.
- Zhang Z W, Wang J P, Wu C Q, et al., 2025. Geological implication of the high purity quartz[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 44(4): 872—887. (in Chinese)
- 赵海波, 王红杰, 张勇, 等, 2024a. 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, 51(1): 42—56.
- Zhao H B, Wang H J, Zhang Y, et al., 2024a. 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*, 51(1): 42—56. (in Chinese)
- 赵海波, 张倩, 张勇, 等, 2024b. 天然石英矿物微量元素赋存特征研究进展及对高纯石英找矿的指示[J]. 西北地质, 57(5): 106—119.
- Zhao H B, Zhang Q, Zhang Y, et al., 2024b. A review of the impurity element chemistry and textures of natural quartz and its application to the prospect of high purity quartz deposit[J]. *Northwestern Geology*, 57(5): 106—119. (in Chinese)
- 中国地质调查局, 2025. 自然资源部有关司局负责同志就《新发现矿种公告》答记者问[EB/OL]. (2025-04-10)[2025-08-08]. https://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/202504/t20250410_784777.html.
- 周浩阳, 2025. 高纯石英的矿床概念、矿床类型与资源评价[J]. 岩石学报, 41(10): 3289—3301.
- Zhou H Y, 2025. Geological definition, deposit types and resource assessment of high-purity quartz[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 41(10): 3289—3301. (in Chinese)
- 周渝, 潘家永, 钱正江, 等, 2023. 江西华云脉石英矿石杂质元素含量特征及质量评价[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 46(5): 446—459.
- Zhou Y, Pan J Y, Qian Z J, et al., 2023. Characteristics of impurity element content in quartz and quality evaluation of vein quartz ore from Jiangxi Huayun[J]. *Journal of East China*

- University of Technology (Natural Science), 46(5): 446—459. (in Chinese)
- 邹本利, 李晶, 李书涛, 等, 2025. 湖北省硅质原料矿(高纯石英矿)勘查开发现状及建议[J]. 资源环境与工程, 39(3): 267—274.
- Zou B L, Li J, Li S T, et al., 2025. Status and suggestions of exploration and development of siliceous materials (high-purity quartz ore) in Hubei Province[J]. Resources Environment & Engineering, 39(3): 267—274. (in Chinese)
- Belkovskiy A I, 2011. Geology and mineralogy of quartz veins of the Kyshtym deposit (Middle Urals)[M]. Miass: Institute of Mineralogy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IMin UrO RAS): 1—234. (in Russian)
- Cao H W, Pei Q M, Santosh M, et al., 2022. Himalayan leucogranites: a review of geochemical and isotopic characteristics, timing of formation, genesis, and rare metal mineralization[J]. Earth-Science Reviews, 234: 104229.
- Fedorov A M, Makrygina V A, Mazukabzov A M, et al., 2021. Resources of quartz raw materials, Gargan block, East Sayan quartzite-bearing area[J]. Georesursy, 23(4): 96—106. (in Russian)
- Fedorov A M, Makrygina V A, Nepomnyashchikh A I, et al., 2019. Geochemistry and petrology of superpure quartzites from East Sayan Mountains, Russia[J]. Acta Geochimica, 38(1): 22—39.
- Gawel B A, Ulvensøen A, Lukaszuk K, et al., 2021. In situ high temperature spectroscopic study of liquid inclusions and hydroxyl groups in high purity natural quartz[J]. Minerals Engineering, 174: 107238.
- Goldberg S A, Dallmeyer R D, 1997. Chronology of Paleozoic metamorphism and deformation in the Blue Ridge thrust complex, North Carolina and Tennessee[J]. American Journal of Science, 297(5), 488—526.
- Götze J, Pan Y M, Müller A, et al., 2017. Trace element compositions and defect structures of high-purity quartz from the southern Ural Region, Russia[J]. Minerals, 7(10): 189.
- Hatcher R D, Merschat Jr A J, Raymond L A, 2006. GEOTRAVERSE: geology of northeastern Tennessee and the grandfather mountain region[M]//Labotka T C, Hatcher Jr R D. Field Trip Guidebook, Southeastern Section Meeting. Tennessee, Knoxville, TN: Geological Society of America : 129—184
- Korekina M A, Savichev A N, Ankusheva N N, et al., 2024. Typomorphic and technological characteristics of quartz of the mica-pegmatite formation on the example of the Berkutinskaya vein (South Urals)[J]. Russian Geology and Geophysics, 65(9): 1062—1074.
- Kuz'min L V, 2023. High-purity quartz concentrates. Application in high-tech industry, modern requirements for quality parameters[J]. News of the Ural State Mining University, 3(71): 94—99. (in Russian)
- Levine J S F, Merschat A J, McAleer R J, et al., 2018. Kinematic, deformational, and thermochronologic conditions along the gossan lead and fries shear zones: constraining the western-eastern blue ridge boundary in northwestern North Carolina[J]. Tectonics, 37(10): 3500—3523.
- Linnen R L, Van Lichtervelde M, Černý P, 2012. Granitic pegmatites as sources of strategic metals[J]. Elements, 8(4): 275—280.
- Miller B V, Fetter A H, Stewart K G, 2006. Plutonism in three orogenic pulses, Eastern Blue Ridge Province, southern Appalachians[J]. GSA Bulletin, 118(1/2): 171—184.
- Müller A, Romer R L, Augland L E, et al., 2022. Two-stage regional rare-element pegmatite formation at Tysfjord, Norway: implications for the timing of late Svecofennian and late Caledonian high-temperature events[J]. International Journal of Earth Sciences, 111(3): 987—1007.
- Nepomnyashchikh A I, Fedorov A M, Zhaboedov A P, et al., 2023. High-purity quartzite from East Sayan[J]. Russian Geology and Geophysics, 64(8): 1005—1014.
- Nepomnyashchikh A I, Shalaev A A, Sizova T Y, et al., 2018. Onset temperatures and kinetics of quartz glass crystallization[J]. Crystallography Reports, 63(2): 290—294.
- North Carolina Department of Quality, 2024. Bedrock geologic map of the SPRUCE PINE 7.5-minute quadrangle, Mitchell, Avery, and McDowell counties, North Carolina[EB/OL]. (2024-11-07)[2025-08-27]. <https://www.deq.nc.gov/energy-mineral-and-land-resources/geological-survey/ofrs-geological-survey/bedrock-geologic-map-spruce-pine-75-minute-quadrangle-mitchell-avery-and-mcdowell-counties-north>.
- Polenov Y A, Ogorodnikov V N, Savichev A N, 2017. Vein quartz of the Kyshtym type[J]. Bulletin of the Ural Branch of the Russian Mineralogical Society, 14: 100—106. (in Russian)
- Savichev A N, Krasilnikov P A, 2019. Statistical characteristics of trace elements of high purity quartz of the Uralian type (Ufaley Quartz Vein Area, South Urals)[J]. Mineralogy, 5(1): 46—56.
- Savichev A N, Krasil'nikov P A, 2020. Uralian ultrapure quartz: raw material source for making transparent quartz glass[J]. Glass and Ceramics, 77(3): 139—144.
- Swanson S E, Veal W B, 2010. Mineralogy and petrogenesis of pegmatites in the Spruce Pine District, North Carolina, USA[J]. Journal of Geosciences, 55(1): 27—42.
- Zhang Y, Pan J Y, Xia F, et al., 2023. Textures and chemical compositions of muscovite and quartz: implications for granite-hosted high-purity quartz mineralization and exploration in South China[J]. Ore Geology Reviews, 161: 105635.
- Zhang Y, Zhao H B, Liu L, et al., 2022. Timing of granite pegmatite-type high-purity quartz deposit in the Eastern Qinling, China: constraints from in-situ LA-ICP-MS trace analyses of quartz and monazite U-Pb dating[J]. Acta Geochimica, 41(2): 197—207.
- Zhou H Y, Müller A, Berndt J, 2023. Quartz chemistry finger-

prints melt evolution and metamorphic modifications in
high-purity quartz deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica*

Acta, 356: 179—195.