

北喜马拉雅马拉山二云母花岗岩的 石英提纯实验和找矿前景



刘洪^{1, 2, 3, 4)}, 李文昌^{1, 2, 3, 5)}, 李光明^{1, 2, 3)}, 侯林^{1, 2, 3, 4)}, 李萱知^{1, 6)},
付建刚¹⁾, 毛星星^{1, 2)}, 樊博^{1, 2)}, 郭伟康¹⁾

- 1) 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 成都, 610218;
- 2) 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉, 430074;
- 3) 成都理工大学地球与行星科学学院, 成都, 610059;
- 4) 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛, 266590;
- 5) 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明, 650093;
- 6) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京, 100083

内容提要:高纯石英是半导体、光伏等战略性新兴产业的关键材料,其高端原料供应存在风险。北喜马拉雅带发育有全球规模最大的新生代淡色花岗岩带,具备形成白岗岩型高纯石英矿的理论潜力,但此前缺乏系统的矿物学和提纯实验验证。本研究旨在通过精细表征和系统实验,阐明马拉山二云母花岗岩石英的杂质赋存状态和提纯可行性,并评价其资源潜力。选取马拉山二云母花岗岩中的石英为研究对象,综合运用偏光显微镜、扫描电镜(SEM)和拉曼光谱进行矿物学和包裹体分析。采用“破碎—浮选—煅烧水淬—混合酸浸—氯化焙烧”全流程提纯工艺,并利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)对提纯前后石英砂中15种关键杂质元素进行定量分析。结果表明:(1)石英原生流体包裹体含量极低,且以次生包裹体为主,指示其母岩浆演化停滞在流体大量出溶阶段之前;(2)经系统提纯,石英SiO₂纯度(即质量分数)从99.8969%提升至99.9942%(4N4级),浮选和酸浸有效去除了共生长石、云母等矿物杂质,氯化焙烧显著降低了晶格中Li、Na含量;(3)最终产品中Al(43.3×10⁻⁶)、Ti(8.03×10⁻⁶)、Li(1.69×10⁻⁶)为主要残留杂质,以类质同象形式赋存于石英晶格,目前经济技术条件下,难以通过常规工艺彻底去除。马拉山二云母花岗岩石英具备形成白岗岩型高纯石英的矿物学基础。北喜马拉雅带内“高分异程度、低流体出溶、变质变形改造、不含金属矿产”的淡色花岗岩是寻找该类型高纯石英资源的有利目标区,为我国突破高端石英资源瓶颈提供了新的找矿方向。

关键词:青藏高原;高分异;淡色花岗岩;白岗岩;高纯石英

高纯石英是一种广泛应用于半导体、光伏和光纤等高新技术领域的关键材料,其品质主要由二氧化硅(SiO₂)纯度及杂质元素含量决定。根据现行标准,高纯石英一般指SiO₂质量分数高于99.995%(即达4N5级以上)的石英产品(Götze et al., 2021; 汪灵, 2022; 张亮等, 2024)。其中4N8级(SiO₂≥99.998%)被视为高端产品,是战略性新兴产业中不可或缺的基础材料。高纯石英的品质不仅依赖于后期的提纯工艺,更受制于其原始成矿地质条件。能

够通过提纯技术加工成高纯石英的天然岩石或矿物被称为高纯石英矿,自然资源部将其定义为:“在当前技术经济条件下,经选矿、提纯可获得高纯石英砂,且其SiO₂含量不低于99.995%,杂质、包裹体含量以及粒度满足半导体、光伏、光学等高新领域应用要求的岩石或矿物”。这类矿产形成于特殊地质环境,全球分布极为有限,属于战略性稀缺资源。

目前,我国在高纯石英资源领域仍面临诸多挑战,包括成矿机理研究不足、优质资源开发利用效率

注:本文为国家重点研发计划课题(编号:2024YFC2910102),国家科技重大专项(编号:2025ZD1008801; 2025ZD1006300),国家自然科学基金—地质联合基金(编号:U2444206)的成果。

收稿日期:2025-11-10;改回日期:2026-01-20;网络首发:2026-02-15;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2026.02.015

作者简介:刘洪,男,1987年生,博士,正高级工程师,硕士生导师,从事矿床学研究和战略性矿产勘查工作;Email:liuh@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者:李文昌,男,1962年生,博士,教授,博士生导师,从事矿床学研究和战略性矿产勘查工作;Email:lwcyndd@163.com。

低以及工业化提纯技术发展滞后等。特别是在半导体和光伏产业链中,用于单晶硅生长的石英坩埚对原料杂质含量要求极为严格(Gaweł et al., 2024),目前,这类高端石英原料主要依赖美国北卡罗来纳州的 Spruce Pine 白岗岩—花岗伟晶岩型矿床(图1)(Müller et al., 2023; 郭宜琳等, 2025)。作为高纯石英的消费和进口大国,我国高端原料对外依存度高,资源供应风险突出,对国家关键产业安全构成潜在威胁。因此,高纯石英矿已被列为我国第174号矿种,实现地质找矿和提纯技术的突破成为保障国家资源安全的紧迫任务。

石英中的杂质元素按其赋存状态主要分为矿物杂质、气液包裹体和晶格杂质三类,这三者的种类、含量及赋存形式共同决定了石英资源的品质(杨晓勇等, 2022)。在提纯过程中,绝大部分的独立矿物杂质和尺寸较大($>10\mu\text{m}$)的气液包裹体可以被有效地分离与去除;然而,对于以类质同象形式取代硅原子进入石英晶格的结构性杂质元素(如 Al^{3+} 、 Ti^{4+} 、 Li^{+} 等),以及粒径微小($<10\mu\text{m}$)的流体包裹体,受限于现有工艺的经济技术可行性,难以实现高效脱除(吴福元等, 2025)。因此,地质找矿的首要

战略目标,是寻找与评价那些天然晶格杂质含量低、微细包裹体稀少的“优质原岩”。当前制约高纯石英提纯工艺进一步突破的核心技术瓶颈,正是上述晶格杂质(尤其是 Al 、 Ti 、 Li)的深度脱除。突破这一瓶颈,既依赖于“优源筛选”——即寻找地质禀赋更佳的矿体,也亟待发展能够靶向去除晶格杂质的革新性提纯技术。

近年来,我国在高纯石英矿的找矿勘查与提纯技术研发方面取得了系统性进展。在新一轮找矿突破战略行动推动下,高纯石英矿资源勘查取得显著成果,先后发现多处高品质矿床(赵金洲等, 2022; 张亮等, 2025)。同时,提纯技术持续发展,已形成以浮选分离、煅烧水淬、组合酸洗及氯化焙烧为核心的成熟工艺体系(汪灵等, 2019; Zhong Taosheng et al., 2022)。国内外实践表明,适配的提纯工艺能有效提升石英原料纯度;基于我国自主研发的深度提纯与定向除杂技术,采自河南东秦岭—大别造山带漂池花岗岩白岗岩石英样品经提纯后 SiO_2 含量可达 99.998%(王建平等, 2025);采自巴基斯坦的某脉石英样品可达 99.998%(Xia Mei et al., 2024);采自印度西北部 Aravalli—Delhi 造山带的伟

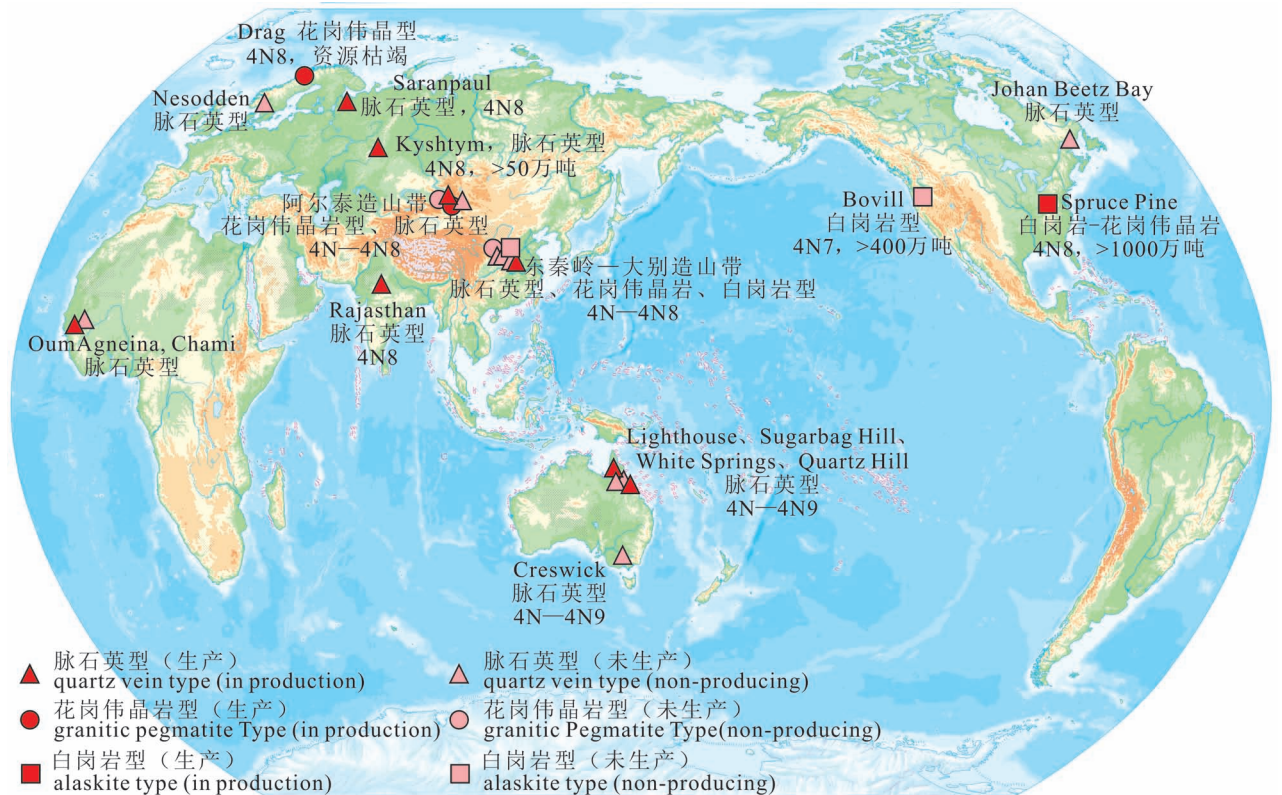


图1 全球主要高纯石英矿床(点)分布图(据王九一等, 2021 修改)

Fig. 1 Global distribution of major high-purity quartz deposits and occurrences (modified from Wang Jiuyi et al., 2021&)

晶岩石英样品甚至可提纯至 99.999% (夏梅等, 2025)。尽管与国际顶尖水平相比,我国在高端产品的稳定性和全产业链整合上仍存差距,但上述系统性进展为我国在该领域加速实现关键技术的国产化突破与资源自主奠定了坚实基础。

高纯石英矿床的成因类型多样,主要包括人工合成石英砂、天然水晶、脉石英、石英岩、伟晶岩和白岗岩(一种淡色花岗岩)等(汪灵,2019)。人工合成石英砂成本高昂,难以实现规模化生产;天然水晶资源稀少、价格昂贵,难以满足大规模工业需求;石英岩成因复杂,杂质元素类型和含量不稳定,产品一致性差,主要用于低端领域;脉石英品质波动大,包裹体含量高,难以满足高端应用要求。相比之下,半导体和光伏行业所需的 4N8 级及以上高端高纯石英砂主要来源于花岗伟晶岩,如美国 Spruce Pine 花岗伟晶岩(Thigpen et al., 2022),几乎垄断了全球高端高纯石英原料的供给。我国高纯石英资源以脉石英型为主(图 2),但该类型普遍规模小、包裹体含量高、品质不稳定(张海啟等,2022)。

淡色花岗岩因经历高分异和动态重结晶作用,通常具备暗色矿物含量低(<10%)、包裹体少、石英含量和品质稳定的特点(陈茂松等,2020;吴福元等,2023;夏宗强和肖敏,2024)。若石英中的 Al、Ti、Li 等关键晶格杂质能够通过经济可行的工艺提纯至高纯石英产品标准,那么该类岩石在矿体规模和开采条件方面的优势将是其他类型高纯石英资源所无法比拟的。因此,淡色花岗岩被视为下一代高纯石英资源的理想目标(周浩阳,2025;刘志超等,2025)。喜马拉雅造山带发育全球规模最大的高分异淡色花岗岩带,岩体经历多期次岩浆演化和后期变质变形改造,具备形成白岗岩型高纯石英矿的良好条件(Liu Zhichao et al., 2019; 张洪瑞和侯增谦,2023)。目前,作者团队已在北喜马拉雅地区的马拉山、错布、康马、苦堆、白马林和定结等地发现多处白岗岩型高纯石英矿点。系统开展这些淡色花岗岩中石英的矿物学研究和提纯潜力评价,对认识该区高纯石英矿的成矿机制和资源潜力具有重要意义。

本研究选取北喜马拉雅带马拉山二云母花岗岩中的石英作为研究对象,综合运用偏光显微镜、扫描电镜(SEM)、拉曼光谱等矿物学分析技术,并结合系统提纯实验和 ICP-MS 杂质元素定量分析,实现以下目标:① 系统揭示石英的矿物学与包裹体特征;② 通过追踪提纯过程中杂质元素的演化行为,阐明 Al、Ti、Li 等关键杂质的赋存状态和分布规律;

③ 展望北喜马拉雅带高纯石英资源的找矿潜力和资源前景。

1 研究背景

1.1 高纯石英资源与矿床类型

全球高纯石英资源主要集中分布于美国、挪威、澳大利亚等国家(Bradley et al., 2016),近年来,印度、巴基斯坦、俄罗斯、挪威等地也陆续有新发现(Zhou Haoyang et al., 2023; Jennings et al., 2024)(图 1)。目前,高纯石英的地质勘查和提纯技术主要由美国少数企业垄断,相关核心资料长期处于保密状态。我国高纯石英地质找矿工作起步相对较晚,自 2010 年起才在局部地区系统开展地质调查(赵武广等,2025)。目前,我国在花岗伟晶岩型和石英脉型高纯石英矿的成因和分布方面已积累一定认识(段小丫等,2025;李开文等,2025),并在阿尔泰、秦岭—大别、巴颜喀拉等造山带,以及扬子古陆西缘、华北克拉通北缘、江南造山带等区域,陆续发现了一批具备提纯为中—高端高纯石英潜力的花岗伟晶岩型和脉石英型资源区(图 2)(李晓宇等,2025;徐进鸿等,2025)。尽管近年来我国高纯石英市场需求增长迅速,加工技术也取得一定进展,但整体水平与国际先进水平仍存在一定的差距。

1.2 地质背景:北喜马拉雅淡色花岗岩带

喜马拉雅造山带位于青藏高原南部(图 3a),介于印度河—雅鲁藏布结合带(YZS)与喜马拉雅主前缘逆冲带(MFT)之间(图 3b,图 4a)。该带发育全球规模巨大的淡色花岗岩带(吴福元等,2015),岩石具高硅、富碱,低钙、铁、镁、钛的地球化学特征(Fu Jian'gang et al., 2023; 石洪召等, 2025),为高品质石英的形成提供了优越的物源基础。

喜马拉雅造山带自北向南可分为:北喜马拉雅岩系[又称特提斯喜马拉雅岩系(THS)]、中喜马拉雅岩系[包括高喜马拉雅岩系(HHS)和低喜马拉雅岩系(LHS)]和南喜马拉雅[又称次喜马拉雅岩系(SHS)](Burg and Chen, 1984;杨毅等,2025)。其构造边界向南依次为印度河—雅鲁藏布结合带(YZS)、藏南拆离系(STDS)、主中央逆冲带(MCT)、主边界逆冲带(MBT)和主前缘逆冲带(MFT)(Zhang Jinjiang et al., 2012;王冬兵等,2024)。

本研究关注的北喜马拉雅带,位于印度河—雅鲁藏布结合带和藏南拆离系之间,主要出露三叠纪—白垩纪沉积岩系。该带内发育的北喜马拉雅片麻岩穹窿带可进一步划分为南、北两个亚带,其中南

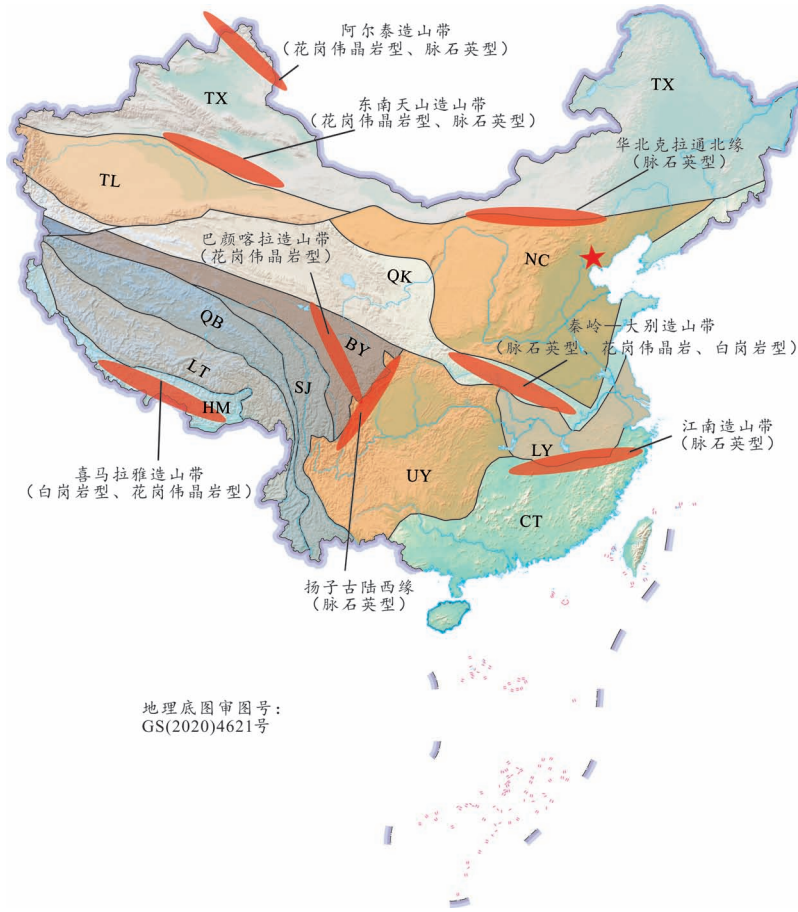


图2 国内主要产出中高端高纯石英矿的成矿带

Fig. 2 Major metallogenic belts hosting medium- to high-grade high-purity quartz deposits in China

TL—塔里木陆块; NC—华北陆块; UY—上扬子陆块; LY—下扬子陆块; CT—华夏陆块; TX—天山—兴安造山带; QK—秦岭—祁连—昆仑造山带; BY—巴颜喀拉地块; SJ—三江弧盆系; QB—羌塘—保山地块; LT—拉萨—腾冲地块; HM—喜马拉雅地块

TL—Tarim Continental Block; NC—North China Continental Block; UY—Upper Yangtze Continental Block; LY—Lower Yangtze Continental Block; CT—Cathaysia Continental Block; TX—Tianshan—Xing'an Orogenic Belt; QK—Qinling—Qilian—Kunlun Orogenic Belt; BY—Bayan Har Terrane; SJ—Sanjiang Arc—Basin System; QB—Qiangtang—Baoshan Terrane; LT—Lhasa—Tengchong Terrane; HM—Himalayan Terrane

亚带为近年新厘定、紧邻藏南拆离系的一系列穹窿构造(付建刚等, 2023), 这些穹窿中产出大量含 Li—Be—W—Sn—Au—Sb—Pb—Zn 稀有金属矿床的淡色花岗岩(张志等, 2025)。本文

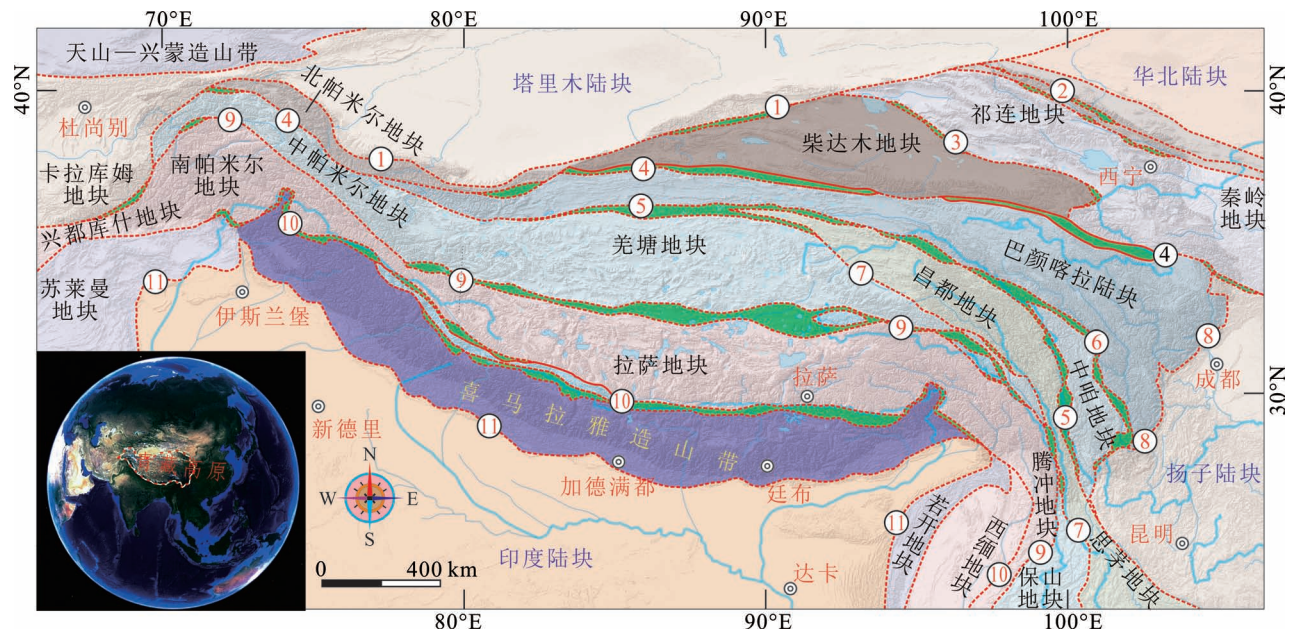


图3 青藏高原大地构造分区图(据刘洪等, 2024)

Fig. 3 Geostructural zoning map of the Qinghai—Xizang(Tibet) Plateau (modified from Liu Hong et al., 2024&

1—西昆仑—阿尔金结合带; 2—祁连山结合带; 3—柴北缘结合带; 4—东昆仑结合带; 5—金沙江结合带; 6—甘孜—理塘结合带; 7—澜沧江结合带; 8—龙门山—盐源逆冲带; 9—班公湖—怒江结合带; 10—印度河—雅鲁藏布结合带; 11—喜马拉雅主前缘逆冲带

1—West Kunlun—Altay Suture Zone; 2—Qilian Suture Zone; 3—Northern Qaidam Suture Zone; 4—East Kunlun Suture Zone; 5—Jinsha Suture Zone; 6—Garze—Litang Suture Zone; 7—Lancang Suture Zone; 8—Longmen—Yanyuan Suture Zone; 9—Bangong—Nujiang Suture Zone; 10—Indus—Yarlung Zangbo Suture Zone; 11—Himalayan Main Boundary Thrust Zone

研究对象马拉山淡色花岗岩位于北亚带,该带分布有包括马拉山在内的多个穹隆(Lee et al., 2004; Ballouard et al., 2020)。这些穹隆的核部由多期次侵位(45 - 8 Ma)的淡色花岗岩构成,包括二云母花岗岩、白云母花岗岩及伟晶岩等,呈现良好的结晶分异序列(Fu Jian'gang et al., 2023; 吴福元等, 2025)。该地区强烈的岩浆分异作用及可能伴随的变质变形,为该区域形成白岗岩型高纯石英矿床提供了优越的地质条件,显示出巨大的找矿潜力。

1.3 研究对象:马拉山二云母花岗岩

马拉山穹隆位于北喜马拉雅片麻岩穹隆带中段的佩古错地区(图4a),其核部由错布、马拉山、佩枯错和波绒等4个淡色花岗岩体组成(图4b)。穹隆西部的错布、马拉山岩性主体为二云母花岗岩,形成时代为中新世(约17 Ma; Gao Li'e and Zeng Lingsen et al., 2012),穹隆东部的佩古错和波绒岩体为复式岩体,包含两种主要的岩性,其中电气石花岗岩形成于渐新世(约28 Ma, 高利娥等, 2013a),二云母花岗岩组成,形成时代为中新世(20~18 Ma; Gao Li'e et al., 2013; Gao Li'e et al., 2021);错布岩体与马拉山岩体的主量化学成分极为相似,但它们与佩枯错和波绒岩体的成分明显不同(高利娥等, 2013b)。穹隆的边部围岩为侏罗系泥质和钙质片岩,接触带见红柱石角岩和矽卡岩,岩体顶部可见糜棱岩化正片麻岩(Aoya et al., 2005; 张进江等, 2011)。马拉山二云母花岗岩体以岩株形式侵入于中侏罗统陆热组泥质片岩中,岩体中部被第四系覆盖,西部出露面积约10 km²,东部出露面积约20 km²(图4)。岩石主要有由石英(35%±)、钾长石(35%±)、斜长石(20%±)、白云母(5%±)和黑云母(5%±)等矿物组成(图5),同时含有锆石、独居石和磷灰石等副矿物。岩体与围岩为明确侵入接触,矿物定向排列显示较弱后期变形,是研究石英原生特征的理想对象。

2 采样和分析测试方法

2.1 样品采集

本次研究在马拉山二云母花岗岩体系统采集了8件代表性新鲜岩石样品。首先对所有样品进行了详细的岩相学观察与鉴定,确认其矿物组成、岩石结构及主要矿物特征均具有高度一致性。鉴于该均一性,本研究选取其中最具代表性的样品MLS-21开展后续的石英提纯实验与精确的杂质元素测试,以评估马拉山岩体的高纯石英成矿潜力。采用的分析

方法主要包括手标本与显微观察、石英提纯、石英精砂溶样消解及电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)杂质元素含量分析等,实验测试工作委托中国科学技术大学地球和空间科学学院完成。

2.2 显微观察与鉴定

光学显微镜观察:制备标准岩石薄片,利用Nikon偏光显微镜进行初步矿物鉴定、结构观察和包裹体统计。扫描电子显微镜(SEM)分析:采用TESCAN MIRA3扫描电镜(SEM)及其配套的能谱仪(EDS),对石英原矿及提纯后的石英砂进行高分辨率背散射电子成像和微区成分分析,以识别微米—亚微米级矿物杂质。拉曼光谱分析:使用JY HORIBA LabRam HR Evolution共聚焦拉曼光谱仪,对石英中的流体及固体包裹体进行无损鉴定,确定包裹体的具体化学成分和物相。

2.3 石英提纯实验

2.3.1 提纯试剂

纯化过程中使用的试剂如下:分析纯十二烷基胺(CH₃(CH₂)₁₁NH₂, AR)、分析纯十二烷基苯磺酸钠(NaC₁₈H₂₉O₃S, AR)、优级纯盐酸(HCl, GR)、优级纯硝酸(HNO₃, GR)、优级纯氢氟酸(HF, GR)、分析纯硫酸(H₂SO₄, AR)、分析纯氢氧化钠(NaOH, AR)和分析纯二氧化锰(MnO₂, AR),全部购自中国上海国药化学试剂有限公司。所有实验均使用电阻率为18.25 MΩ·cm的超纯去离子水。

2.3.2 提纯程序

石英纯化技术涉及几个步骤:预处理、物理分离方法、包裹体爆裂、化学深度纯化和氯化焙烧。预处理:包括粉碎、擦洗、脱泥、筛选和研磨。物理分选:对原矿进行颞式破碎与对辊破碎,随后进行筛分,获取合适粒级的石英砂。依次进行重选(去除重矿物)、磁选(去除磁性矿物如黑云母)和浮选(分离长石、云母等共生硅酸盐矿物)。包裹体爆裂:对物理分选后的精矿进行煅烧—水淬处理,利用石英与包裹体之间热膨胀系数的差异,使内部包裹体破裂、暴露。化学深度纯化:采用特定浓度的混合酸对石英砂进行酸洗,以溶解暴露出的杂质及晶格边缘的易溶元素。氯化焙烧:在高温下使难以酸溶的痕量金属杂质转化为气态氯化物而挥发去除。

2.4 杂质元素含量分析

采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)对石英精砂中15种主要杂质元素含量进行测定。样品前处理使用HNO₃—HF混合酸体系,于密闭高压溶样罐中对石英精砂进行全消解。分析过程中采

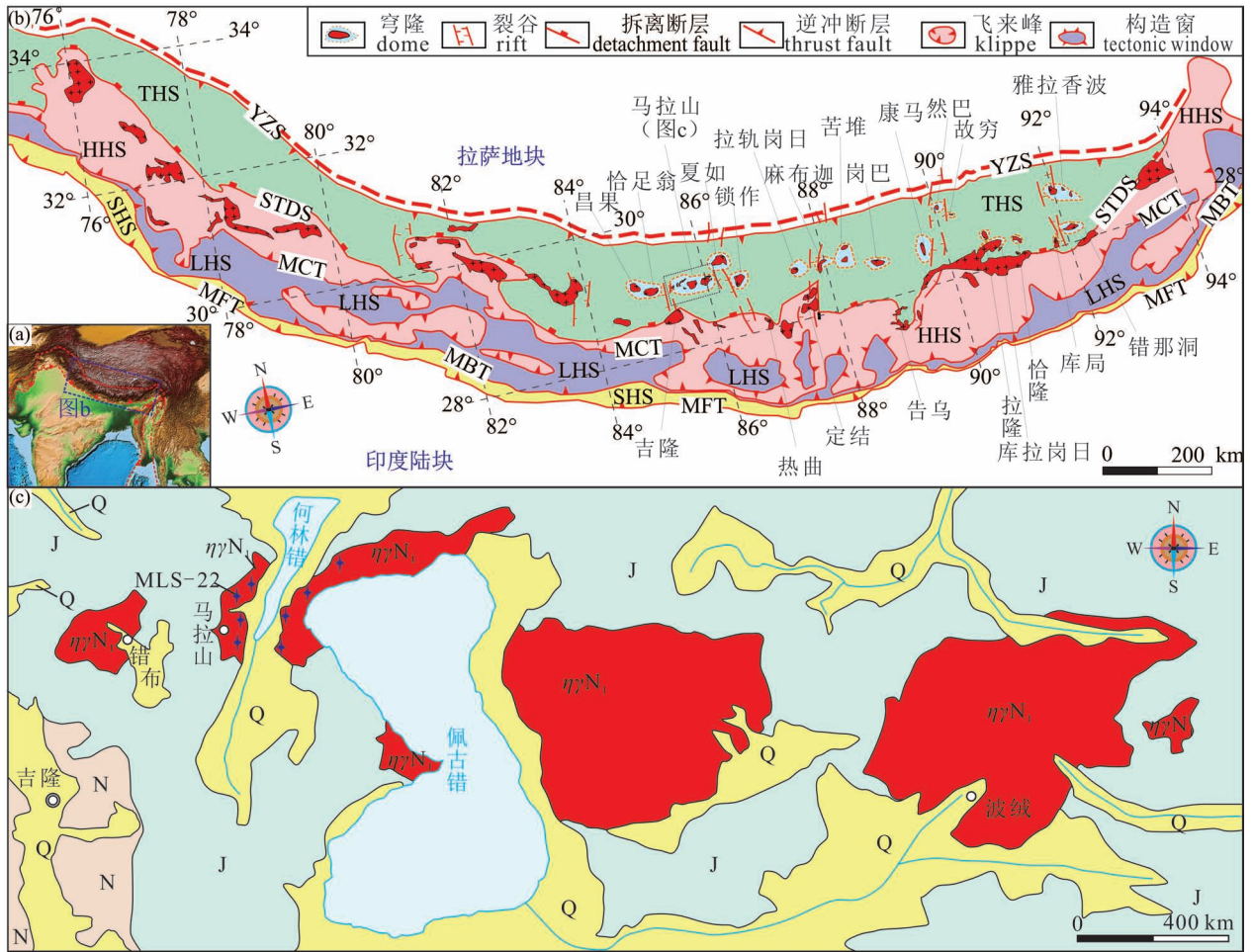


图4 (a) 喜马拉雅造山带位置示意图; (b) 喜马拉雅造山带地质简图及浅色花岗岩分布; (c) 马拉山地区地质简图

Fig. 4 (a) Schematic diagram of the location of the Himalayan orogenic belt; (b) geological map of the Himalayan orogenic belt and distribution of light colored granite; (c) geological map of Malashan area

YZS—印度河—雅鲁藏布结合带; STDS—藏南拆离断层系; MCT—喜马拉雅主中央断裂带; MBT—喜马拉雅主边界断裂带; MFT—喜马拉雅主前缘断裂带; THS—特提斯喜马拉雅岩系; HHS—高喜马拉雅岩系; LHS—低喜马拉雅岩系; SHS—次喜马拉雅; Q—第四系; N—新近系砾岩、砂岩; J—侏罗系泥质—钙质片岩; $\eta\gamma N_1$ —中新世二云母花岗岩

YZS—Indus—Yarlung Zangbo Suture Zone; STDS—Southern Xizang (Tibet) Detachment Suture Zone; MCT—Himalayan Main Central Thrust Zone; MBT—Himalayan Main Boundary Thrust Zone; MFT—Himalayan Main Frontal Thrust Zone; THS—Tethys Himalayan rock series; HHS—High Himalayan rock series; LHS—Low Himalayan rock series; SHS—Sub-Himalaya; Q—Quaternary; N—Neogene conglomerate and sandstone; J—Jurassic mudstone—calcareous schist; $\eta\gamma N_1$ —Miocene biotite granite

用氦气碰撞模式,以抑制潜在的光谱干扰。全程选用国家标准物质 GBW07837 进行质量控制,保障分析结果的准确性和可靠性。

3 分析结果

3.1 手标本和显微鉴定

在手标本层面(图 5b),马拉山二云母花岗岩中的石英颗粒呈烟灰色,具有半透明油脂光泽,结构为细粒粒状,肉眼可见其与大量长石、白云母及黑云母共生。显微镜下观察进一步显示,石英呈细粒粒状

结构,粒径普遍约为 1 mm,与钾长石、黑云母和白云母紧密共生(图 5c—d)。单偏光下,石英表现为无色透明,晶形较为完整,结晶程度良好,但内部微裂纹较为发育(图 5c—d)。正交偏光下,石英在标准厚度薄片呈现灰白干涉色,局部因厚度不均出现绿、红、蓝等异常干涉色。石英颗粒形态以他形粒状为主,表面总体光滑,部分表面呈不平整或不规则形状,部分颗粒显示不均匀波状消光,整体呈中粗粒状变晶结构。晶界清晰,多呈线状或锯齿状(图 5c—d,图 6a—d),这些共生的钾长石被认为是铝、钾等

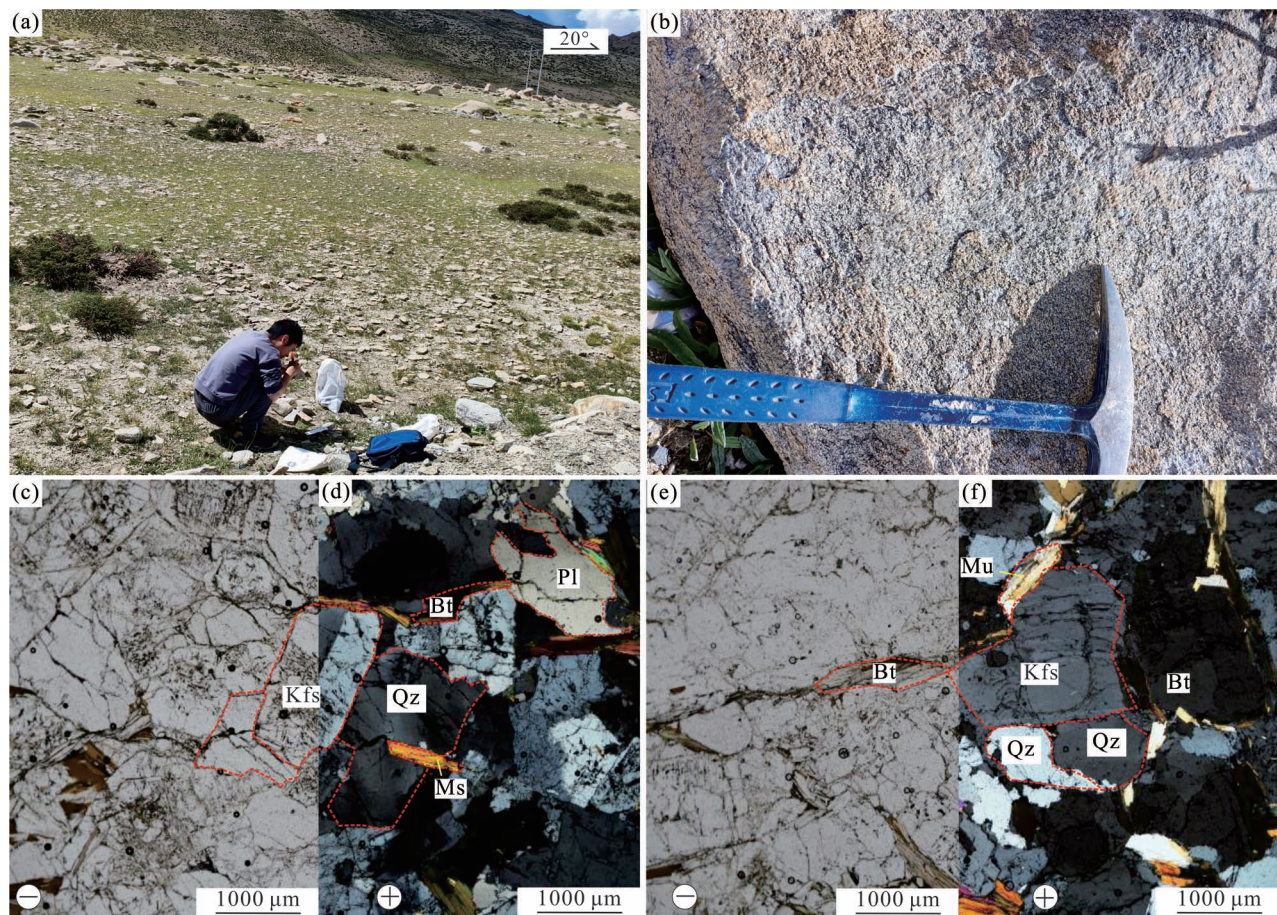


图5 马拉山云母花岗岩岩相学照片:(a) (b)—野外照片;(c)—(f) 偏光显微照片(-为单偏光,+为正交偏光)

Fig. 5 Petrographic photos of the Malashan two-mica granite: (a) (b) field photographs; (c)—(f) polarized light microscope (“-” is crossed light; “+” is crossed polarized light)

Qz—石英; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Bt—黑云母; Ms—白云母

Qz—quartz; Kfs—K-feldspar; Pl—plagioclase; Bt—biotite; Ms—muscovite

杂质元素的重要来源之一。

3.2 流体包裹体特征

石英矿物整体较为纯净(图 6a—d),包裹体含量极少,且沿裂隙分布、易于在加工中去除的次生包裹体为主(图 6c)。显微镜下,石英精砂颗粒主要为透明的纯颗粒,少部分为透明度稍差不纯颗粒。纯颗粒内部几乎没有夹杂物(图 6a—c),不纯颗粒中流体包裹体呈不均匀分布,主要为簇状,呈线性分布,形状不规则,尺寸小,大多为 1~5 μm(图 6d)。流体包裹体主要为富集液相的气液两相包裹体,直径多为 1~5 μm,拉曼光谱分析显示(图 7),石英样品中流体包裹体的气相和液相成分主峰分别位于 1276 cm⁻¹ (CO₂)、1385 cm⁻¹ (CO₂) 和 3430 cm⁻¹ (H₂O),表明其液相组分为 H₂O,气相组分为 H₂O 和 CO₂(图 7)。提纯后的马拉山石英精砂在流体包

裹体含量、类型、成分和排列方式等特征上已与美国矽比科 IOTA—CG 标准石英砂相似,甚至流体包裹体含量比 IOTA—CG 更低(图 6)。

3.3 提纯结果

本文采用 ICP-MS 对提纯过程中的石英精砂进行了 15 种主要杂质元素的跟踪测定(表 1),以揭示杂质的去除规律和最终产品的纯度。浮选后:石英砂杂质的总质量分数为 1031×10⁻⁶, SiO₂ 质量分数为 99.8969%。主要杂质为 Al (500×10⁻⁶)、K (258×10⁻⁶)、Na (155×10⁻⁶)、Ca (47.4×10⁻⁶)、Fe (35.9×10⁻⁶)、Li (10.1×10⁻⁶)、Ti (12.3×10⁻⁶) 和 Mg (8.39×10⁻⁶)。两次酸洗后:总杂质质量显著降低至 68.8×10⁻⁶, SiO₂ 含量提升至 99.9931%。Al (43.8×10⁻⁶)、Ca (2.41×10⁻⁶)、K (1.79×10⁻⁶)、Li (8.36×10⁻⁶)、Na (3.32×10⁻⁶) 和 Ti (8.29×10⁻⁶) 等元素含

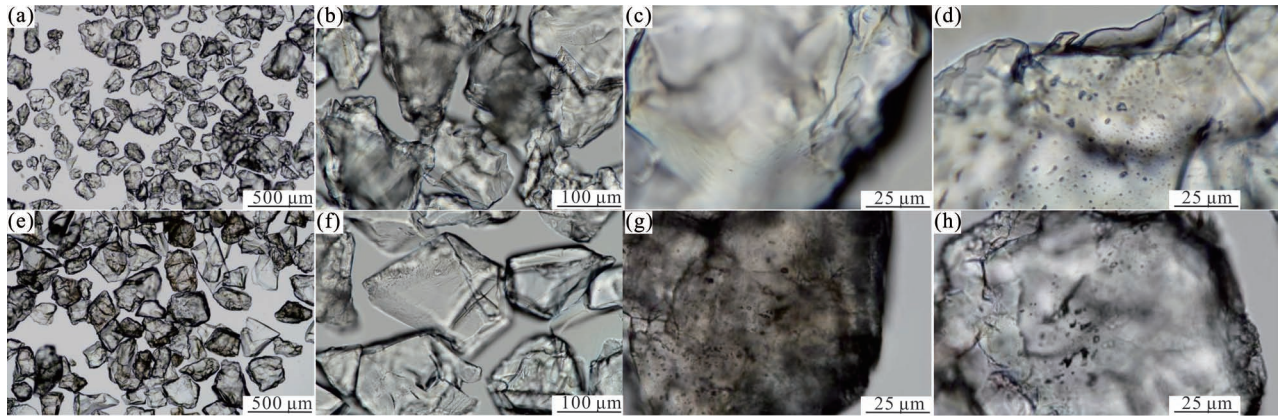


图6 马拉山石英砂显微镜下特征:(a)—(d) 马拉山花岗岩石英精砂;(e)—(h) 美国矽比科 IOTA—CG 石英精砂

Fig. 6 Microscopic characteristics of quartz sand:(a)—(d) quartz concentrate from the Malashan granite;
(e)—(h) quartz concentrate from the Spruce Pine granite-pegmatite deposit, USA

量大幅下降,含量大幅下降,表明酸洗有效去除了矿物杂质。氯化焙烧后:总杂质含量进一步降至 58.3×10^{-6} 。最终,马拉山二云母花岗岩中的石英经系列提纯后, SiO_2 质量分数达到 99.9942% (4N4 级) (表 1,图 8)。

4 讨论

4.1 提纯工艺和效果分析

为深度净化马拉山二云母花岗岩中的石英,本

表 1 马拉山石英精砂 15 种主要杂质元素含量 ($\times 10^{-6}$)

Table 1 The content of main metallic elements in the quartz ore and processed quartz ($\times 10^{-6}$)

元素	浮选	一次酸洗	二次酸洗	氯化	EQL	USA
Al	500	45.6	43.8	43.3	11.13	14.00
B	0.421	0.182	0.152	0.029	0.11	0.10
Ca	47.4	3.81	2.41	2.21	1.01	0.60
Co	0.023	0.009	0.012	0.023		bdl
Cr	1.65	0.021	0.021	0.011	0.02	0.01
Cu	0.091	0.049	0.073	0.009	0.01	0.02
Fe	35.9	0.951	0.249	0.262	1.91	0.30
K	258	3.782	1.79	1.78	2.07	0.70
Li	10.1	8.38	8.36	1.69	0.07	0.50
Mg	8.39	0.339	0.089	0.093	0.05	0.04
Mn	0.819	0.421	0.079	0.022	0.07	0.03
Na	155	7.41	3.32	0.531	1.77	0.90
Ni	0.501	0.028	0.022	0.009	0.05	bdl
Ti	12.3	8.64	8.29	8.03	2.47	1.20
Zr	0.30	0.211	0.213	0.229	0.11	bdl
总和	1031	79.9	68.8	58.3	20.85	18.40
SiO_2 (%)	99.8969	99.9920	99.9931	99.9942	99.9979	99.9982

注:EQL—东秦岭漂池白岗岩石英砂(王建平等,2025);USA—美国矽比科公司的主要高纯石英产品——IOTA—CG 石英砂(夏梅等,2025)。EQL 和 USA 数值为原文照抄;“-”表示未测,“Bdl”表示低于检测限。

研究系统实施了“浮选—煅烧水淬—组合酸洗—氯化焙烧”的梯级提纯工艺,旨在逐级去除不同赋存状态的杂质。通过工艺机理分析与提纯效果关联,明确各环节的除杂效能与限度。

4.1.1 浮选分离

基于矿物表面疏水性的差异,浮选是分离石英与共生硅酸盐矿物的有效方法(Han Guang et al., 2020)。长石、云母等硅酸盐矿物的性质与石英相似,但晶体结构和表面性质不同。根据矿物颗粒的表面性质,特别是表面疏水性的差异,浮选可以有效地将石英与长石、云母等硅酸盐矿物分离出来。在这些方法中,泡沫浮选是有效的石英砂提纯方法之一。通过矿物颗粒与捕收剂、抑制剂、活化剂和 pH 调节剂之间的相互作用,可以有效增加不同颗粒表面之间的疏水性差异,从而实现矿物的分离(Jiang Xuesong et al., 2020)。岩相学观察表明,马拉山石英与钾长石、黑云母和白云母紧密共生(图 5)。为此,本研究采用 HF 作为活化剂,烷基胺类表面活性剂作为阳离子捕收剂,旨在分离这些杂质矿物。

光学显微镜观察表明,石英颗粒与钾长石、黑云母和白云母紧密共生(图 5),这意味着浮选实验主要集中在分离石英和钾长石、黑云母和白云母上。为了获得尽可能纯净的石英砂,使用氢氟酸作为活化剂,烷基胺表面活性剂作为阳离子收集剂,从石英中分离长石、云母等杂质。经浮选处

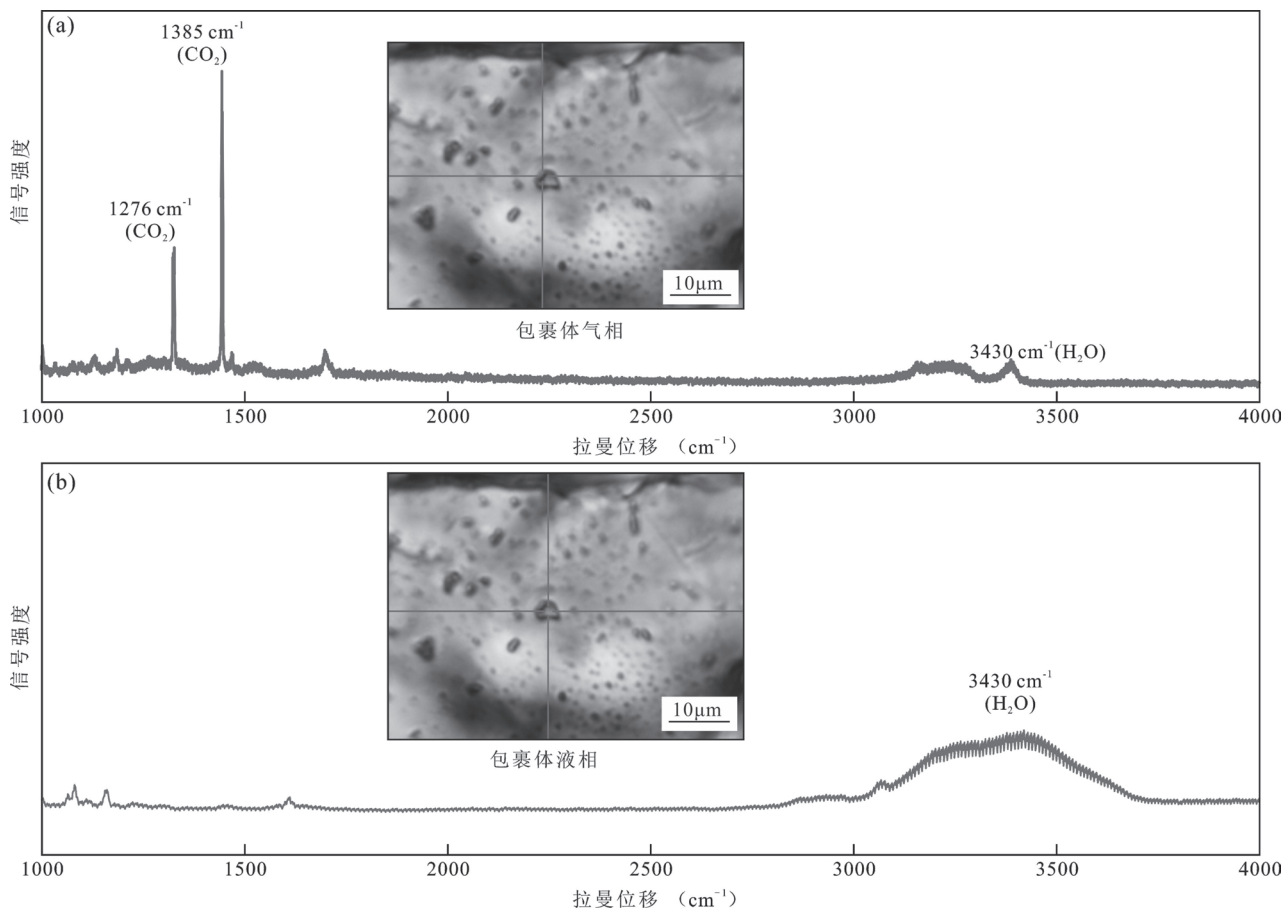


图7 流体包裹体包裹体拉曼图谱

Fig. 7 Raman spectra of fluid inclusions

理后 Al、Ca、K、Li、Na 和 Ti 等杂质元素显著减少(图 8a—d)。这表明浮选过程有效去除了一定量的长石、云母等共生矿物,但由于原矿中长石和云母含量高,且石英为细粒粒状结构,因此在破碎成砂时极易形成连生体,这些连生体无法通过物理提纯去除(图 9a—b),导致浮选石英砂杂质元素含量高,还需要进一步的提纯。

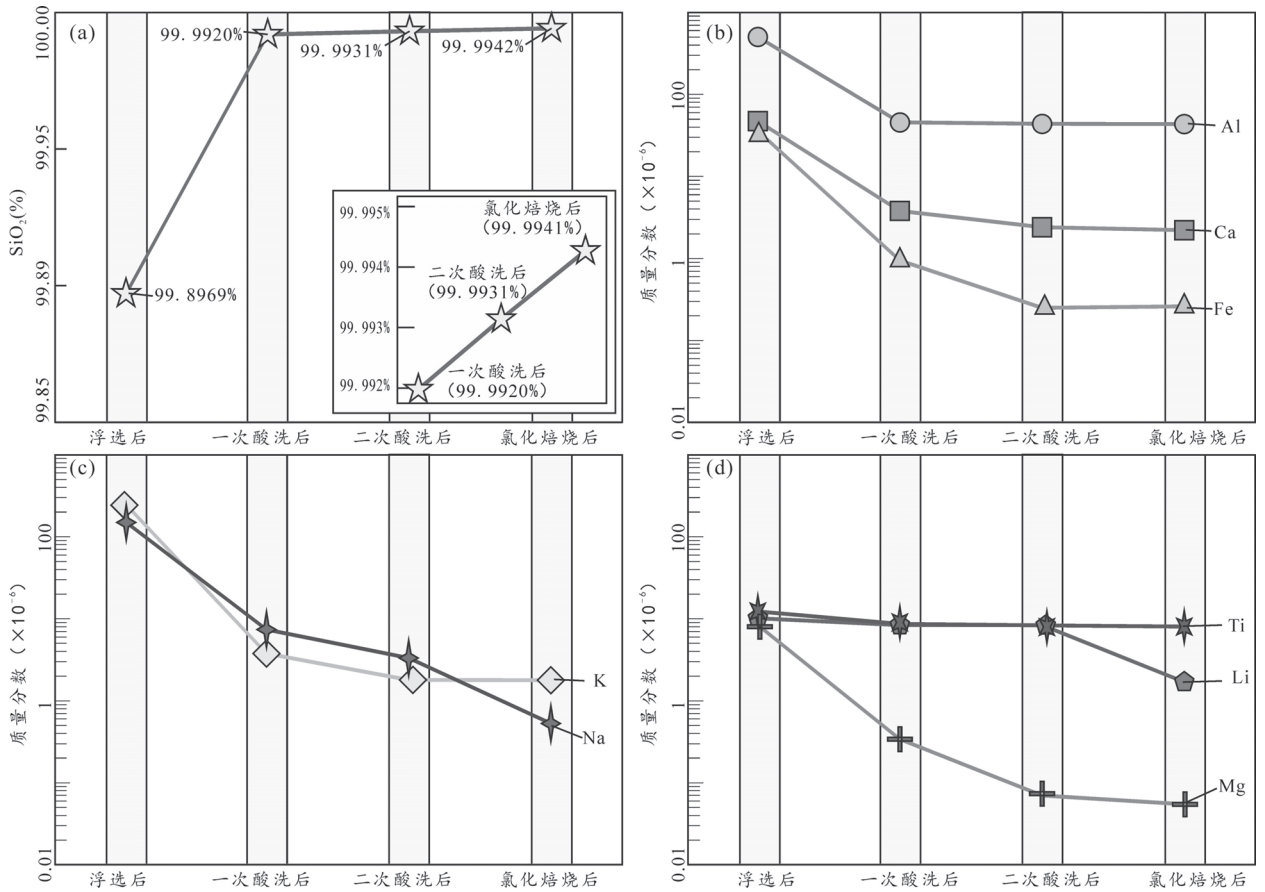
4.1.2 煅烧水淬

煅烧水淬是石英提纯的重要过程。石英高温煅烧后,其晶体结构和杂质元素的发生根据煅烧温度、保温时间和石英本身的纯度而变化。通常, α 石英在 573°C 下转变为 β 石英,在 870°C 下给予足够的时间, β 石英可以转变为鳞石英。同时该过程也利用石英与包裹体之间热膨胀系数的差异,使内部包裹体破裂、暴露。在此过程中,石英伴随着晶型转变、体积变化、夹杂物膨胀和爆破,这些都导致石英中出现大量的微裂纹。石英在高温煅烧后,再进行水淬和冷却,由于快速淬灭过程中的高热应力梯

度,促进了微裂纹的形成和加深。石英矿石一旦破碎成砂,颗粒就会变细,比表面积也更大。这使得杂质在煅烧过程中更容易逸出,并增加了淬灭过程中的冷却速率和热应力。因此,先前包裹在石英中的矿物和流体夹杂物暴露程度更大,高温相变过程富集了石英表面的 Al、Li、Na 和 K 等元素,从而更好地去除了这些杂质(Pan Xiaodong et al., 2020)。此外,高温煅烧—水淬有利于后续的酸洗过程的有效提纯。高温煅烧和水淬过程中会使得石英晶体表面的微裂纹沿晶体生长方向形成近似平行的裂缝。这些微裂纹不断延伸到石英中,这对酸溶液在后续的酸洗处理中的渗透非常有利,酸溶液可以沿着裂纹渗透到颗粒内部,导致裂纹加深和扩大,并加速酸溶液对颗粒内部杂质的溶解(左秋霞等,2022)。

4.1.3 组合酸洗

酸洗是去除石英矿物表层、裂缝或晶格上存在的各种金属杂质,以及长石、云母等少量残留硅酸盐矿物的有效方法,从而获得更高的净化水平。酸洗

图8 石英提纯过程中 SiO_2 及杂质元素的变化Fig. 8 Variations in SiO_2 content and impurity element concentrations during the quartz purification process

工艺中常用的酸包括硫酸(H_2SO_4)、盐酸(HCl)、草酸($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$)和氢氟酸(HF)和硝酸(HNO_3)等(Du Feihu et al., 2011; Tuncuk et al., 2016; Yang Changqiao et al., 2018),其中,氢氟酸能快速溶解残留的云母、长石等硅酸盐矿物,而且腐蚀性也很强。石英表面的适度溶解会暴露石英中所含的一些夹杂物。此外,它很容易扩散到石英晶格中,使浸出液与填充在石英晶格中的金属原子发生反应并溶解。因此,添加一定量的氢氟酸有利于酸洗的净化效果。但是,氢氟酸的量应适当,以避免溶解更多的石英。实验表明,硫酸显示出最有效的杂质去除,其次是氢氟酸和盐酸(Zhong Lele et al., 2013)。

杂质元素中,Fe和Mn的去除效果最好,Al和K的去除率适中,而Ca和Na的去除率最低,整体杂质含量保持较高水平。进一步的研究表明,混合酸的组合可以产生协同效应,从而在使用 HCl-HF-HNO_3 时更有效地去除杂质。此外,采用更有效的热压-酸洗法对石英砂进行深度净化(Zhong Lele et al., 2013)。在热压浸出过程中,反应温度和压力

的升高加剧了混合酸的运动,加速了石英和杂质矿物的分解反应。浸出液迅速吸附在微裂纹活性部位,发生化学反应,加剧了退化坑的腐蚀,使微裂纹变宽。这种腐蚀延伸到晶体内部,为晶格杂质提供了更多的活化界面。因此,包裹在石英晶格中并存在于晶体之间晶界处的杂质被分解和溶解,从而能够去除金属杂质离子。在提纯过程中,经过两次酸洗提纯后得到的石英砂总杂质元素为 68.94×10^{-6} , SiO_2 含量为99.9931%,主要杂质元素含量明显降低(表1,图8):Al(43.8×10^{-6})、Ca(2.41×10^{-6})、K(1.79×10^{-6})、Li(8.36×10^{-6})、Na(3.32×10^{-6})和Ti(8.29×10^{-6})。经过二次酸洗后,马拉山石英样品中石英砂的杂质元素含量未显示出显著差异,尤其是铝(Al)元素。这表明,诸如长石和云母等矿物杂质已在第二次酸洗前被有效去除(图9c—d)

4.1.4 氯化焙烧

经破碎、超声脱泥、浮选、高温煅烧、水淬、热压、酸洗等提纯后,马拉山石英样品已经达到了较高的纯度,但仍存在一定量的晶格杂质元素和微小的气

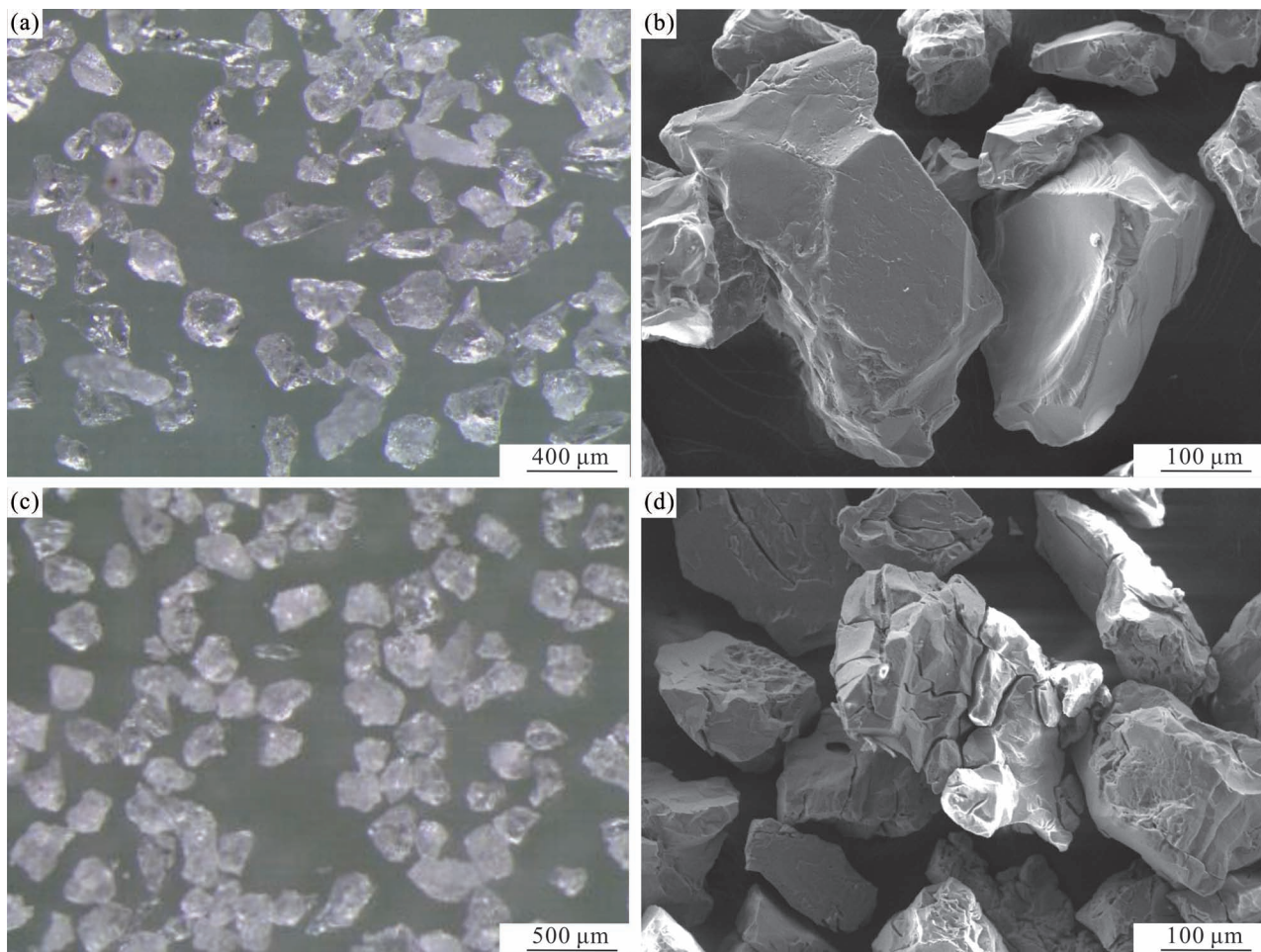


图9 提纯后的马拉山石英砂: (a)(b) 浮选石英砂; (c)(d) 酸洗石英砂;
(a)(c) 普通显微镜照片; (b)(d) 扫描电镜照片

Fig. 9 Malashan quartz sand: (a) (b) floated quartz sand; (c) (d) acid-leached quartz sand; (a) (c) ordinary microscope photographs; (b) (d) scanning electron microscope photographs

液夹杂物,还存在一定的提纯空间。为了进一步去除这些杂质,在酸洗石英砂上进行了氯化实验。在一定的温度和大气条件下,氯化过程使石英砂中的金属氧化物变成金属氯化物,并通过氯化剂的引入而溶解或挥发。该过程实现了金属元素的分离,在石英表面和内部之间形成化学梯度。这种梯度有助于通过扩散排出石英内的夹杂物和杂质,从而达到更深层次的净化效果。经过氯化焙烧,进一步清除了残留的Li(降低至 1.69×10^{-6})和Na(降低至 0.53×10^{-6}) (图8),得到了纯度较高的石英精砂。仅上述提纯过程后,马拉山石英砂纯度达到SiO₂质量分数99.9942%(4N4),残留杂质主要为Al(43.3×10^{-6})、Ti(8.03×10^{-6})、Li(1.69×10^{-6})、Ca(2.21×10^{-6})和K(1.78×10^{-6})等。K和Ca推测赋存于石英砂中残留的微细流体包裹体(<10 μm)中,而杂

质元素Al、Li和Ti,主要以类质同象的形式存在于石英晶格中。

通过两次酸洗和氯化,马拉山二云母花岗岩中石英大部分关键杂质元素都有明显降低,达到高纯石英单元素指标,但Al、Ti却没有显著变化,说明浮选能取出大部分矿物杂质中的Al、Ti杂质,但酸洗等现有除杂工艺很难清除石英晶格中的Al、Ti杂质。制约该石英原料提纯至超高纯度的主要瓶颈,在于石英原生晶格中结构性的铝杂质。因此,寻找和开发能够靶向性脱除晶格铝,或从源头(地质成因)上优选晶格铝含量极低的原生石英矿,是获得高品质高纯石英砂必须解决的根本问题。未来的研究重点应集中于石英晶体结构中杂质元素的赋存状态精准表征,以及与之对应的深度净化新原理和新工艺。

4.1.5 提纯评价和展望

淡色花岗岩中的石英矿石品质主要受其内部杂质影响。常规伴生矿物(如长石、云母等)通常可通过破碎、磁选和浮选等方法去除;尺寸大于微米级的流体包裹体和矿物杂质,也可借助高温煅烧、酸洗等手段处理。进一步采用氯化焙烧工艺,还能有效降低Na、K等杂质元素含量。然而,对于亚微米级的弥散状流体包裹体,以及赋存于石英晶格中的Al、Ti等元素,本文纯化工艺难以彻底去除。未来可探索结合氯化焙烧、真空煅烧和微波煅烧等技术,以最大限度脱除晶格杂质。但此类化学提纯方法在工业应用中成本较高,制约了其大规模使用。因此,石英中晶格杂质元素(尤其是Al、Ti)的含量,以及流体包裹体($<10\mu\text{m}$)的组成特征,是限制石英纯度与应用方向的关键因素,也是评价高纯石英资源质量的核心指标。换言之,石英形成过程中所固有的晶格杂质和包裹体组成,基本决定了其最终提纯品质——原生矿石的质量是决定高纯石英产品能否达到高端应用要求的基础(王登红等, 2025; 吴福元等, 2025)。

4.2 北喜马拉雅带高纯石英矿找矿前景讨论

北喜马拉雅淡色花岗岩带作为青藏高原碰撞造山过程的典型产物,不仅是理解大陆地壳演化的重要窗口,更因其内部产具备特殊成岩条件的淡色花岗岩,将成为寻找高纯石英矿的重点区域。

北喜马拉雅淡色花岗岩源于新特提斯洋俯冲板片及相关沉积物的深部部分熔融,普遍经历了强烈的结晶分异作用(吴福元等, 2015)。该过程导致熔体中 SiO_2 持续富集,而Ti、Fe、Mg、Ca等基性组分随角闪石、黑云母等矿物的早期结晶被有效分离,最终形成一套以二云母花岗岩、白云母花岗岩和钠长石花岗岩为主的高硅、过铝质、且Ti、Fe、Mg、Ca等杂质背景低的淡色花岗岩。然而,要形成高品质石英,关键在于筛选出其中那些虽经高度分异、但岩浆演化恰好在广泛流体出溶阶段之前停滞的稀有岩体。这是因为:若分异程度不足,石英晶格中Ti、Fe、Mg、Ca等杂质含量会因岩浆中这些元素浓度较高而增加;若演化进入流体大量出溶阶段,流体活动会将Al、Li、K、Na等杂质带入石英晶格,并导致石英捕获大量流体包裹体(刘志超等, 2025)。唯有停留在该临界点之前的高分异岩体,其石英晶体不仅流体包裹体稀少,晶格中关键杂质元素(如Ti、Al、Li)的本底含量也天然较低,从而具备形成优质高纯石英的理想物质基础。

北喜马拉雅带发育的片麻岩穹窿构造及藏南拆离系,为淡色花岗岩的侵位和改造提供了动力学背景。伴随的中高温变质变形作用(Ballouard et al., 2020)能驱动动态重结晶,有效“修复”石英晶格缺陷,并将赋存于缺陷或晶界中的杂质元素(如 Al^{3+} 、 Ti^{4+})排出,进一步降低杂质含量,该过程可使石英总杂质含量降低50%以上(刘志超等, 2025)。因此,经历后期构造改造的“高分异、低流体出溶”型淡色花岗岩,其石英原料的初始纯度和提纯潜力最为突出。

北喜马拉雅淡色花岗岩带东西延伸超过1500 km,带内已识别出数十个规模不等的片麻岩穹窿和岩体群(付建刚等, 2023)。这些岩体在垂向和横向上多呈现规律的岩性分带,通常从核部向边部,岩浆分异程度逐渐增高。本文研究的马拉山岩体即为一个典型实例:其石英矿物整体纯净,包裹体含量极少,且以沿裂隙分布的次生包裹体为主(图6a—d),这一特征表明,在石英结晶过程中,其寄主岩浆并未伴随大规模的流体出溶作用。倘若该高分异岩浆演化至流体大量出溶阶段,石英晶体将捕获丰富的原生流体包裹体;而当前观察到的极低包裹体含量,尤其是原生包裹体的缺乏,恰说明该岩体的演化停滞在流体大量出溶之前,从而使其成为相对理想的高纯石英原料。初步的提纯实验表明,其石英纯度可达4N4级,证实了此类岩石的高纯石英成矿潜力。若在该带内寻找到岩浆分异程度高、且流体出溶程度较马拉山岩体更低的淡色花岗岩体,其石英晶格中Al、Li等关键杂质的本底含量将会更低,从而具备发现4N8级超高纯石英资源的潜力。与规模有限、形态复杂的花岗伟晶岩型及脉石英型矿床相比,此类白岗岩型矿化具有规模大、岩性均一、矿体连续性好的显著优势,更适于大规模工业化开采,为我国突破高纯石英资源瓶颈提供了新的战略方向。

综上所述,北喜马拉雅淡色花岗岩带具备优越的成矿地质条件和巨大的资源潜力。未来工作应围绕“高分异程度、低流体出溶、变质变形改造、不含金属矿产”的淡色花岗岩,开展系统性调查和资源评价,建立相适应的勘查技术体系,为实现我国高纯石英资源的自主可控奠定理论基础和资源储备。

5 结论

(1) 马拉山二云母花岗岩中的石英原生品质优良,包裹体含量极低,在现有提纯工艺下,其石英原料最高纯度可达 SiO_2 质量分数99.9942%(4N4

级)。

(2) 制约马拉山石英纯度进一步提升的主要瓶颈,是以类质同象形式赋存于石英晶格中的 Al、Ti、Li 等关键元素。

(3) 北喜马拉雅带内具有“高分异、低流体出溶、受变质变形改造”特征,且不含金属矿产的淡色花岗岩,具备发育规模大、侵位深、微量元素背景稳定的白岗岩型高纯石英矿床的良好潜力,是寻找高纯石英资源的有利目标区。

致谢: 本文在写作过程中得到了中国科学技术大学杨晓勇教授、夏梅博士后,中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所朱黎宽高级工程师的指导和帮助,审稿专家为完善本文提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

陈茂松, 项新葵, 占岗乐, 尹青青, 余振东, 王天晨, 徐裕敏, 谭荣.

2020. 大湖塘矿集区一矿带燕山晚期成矿后花岗岩斑岩年代学、地球化学特征及对成矿结束时间的约束. 东华理工大学学报(自然科学版), 43(5): 401~416.

段小丫, 胡方泱, 张少华, 封占江, 梁永, 刘延虎, 王志强, 李海宝, 燕铁男. 2025. 华北克拉通北缘三木代庙地区花岗岩与伟晶岩石英微量元素成分特征及其对高纯石英成因的指示. 岩石学报, 41(10): 3432~3452.

付建刚, 李光明, 郭伟康, 董随亮, 张海, 张林奎, 梁维, 焦彦杰. 2023. 西藏拉隆穹窿淡色花岗岩中白云母矿物地球化学特征及对稀有金属成矿的指示. 东华理工大学学报(自然科学版), 46(6): 555~575.

高利娥, 曾令森, 侯可军, 郭春丽, 唐索寒, 谢克家, 胡古月, 王莉. 2013a. 藏南马拉山穹窿佩枯复合淡色花岗岩体的多期深熔作用. 科学通报, 58(27): 2810~2822.

高利娥, 曾令森, 王莉, 侯可军, 郭春丽, 唐索寒. 2013b. 藏南马拉山高钙二云母花岗岩的年代学特征及其形成机制. 岩石学报, 29(6): 1995~2012.

郭宜琳, 褚杨, 夏冉然, 薛振华. 2025. 美国 Spruce Pine 地区高纯石英原岩石变形研究. 岩石学报, 41(10): 3469~3489.

何嘉伟, 张森森, 刘波, 孙红娟, 王振轩, 彭同江. 2025. 花岗伟晶岩型高纯石英原料的工艺矿物学特征及提纯工艺对比. 矿物岩石地球化学通报. <https://doi.org/10.3724/j.issn.1007-2802.20250038>. (online).

胡欢, 王汝成, 谢磊, 徐焜鑫, 董少春. 2025. 美国 Spruce Pine 白岗岩长石和云母矿物学特征研究: 对高纯石英原料矿的指示意义. 岩石学报, 41(10): 3453~3468.

焦彦杰, 张志, 董磊. 2023. 三维电性资料揭示西藏扎西康矿床深部结构. 东华理工大学学报(自然科学版), 46(6): 576~584.

李开文, 王建平, 张正伟, 柴建玉, 刘小驰, 方怀宾, 黄业豪. 2025. 东秦岭高纯石英矿主要类型、分布规律和找矿方向. 岩石学报, 41(10): 3321~3339.

李晓宇, 王建平, 胡天杨, 蔡志超, 柴建玉, 左鹏飞, 刘小驰. 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. 岩石

学报, 41(10): 3340~3358.

刘洪, 黄瀚霄, 张志, 李光明, 欧阳渊, 张林奎, 吴建阳, 黄勇, 曹华文, 张腾蛟, 张景华, 李富, 代作文, 李洪梁, 兰双双, 向安平, 吕梦鸿, 柳潇, 周锦, 石洪召, 余槐, 张洪铭. 2024. 西藏冈底斯成矿带西段斑岩浅成低温热液型铜金多金属成矿作用与找矿预测. 武汉: 中国地质大学出版社: 1~127.

刘志超, 王佳敏, 蓝廷广, 张少华, 刘小驰, 吴福元. 2025. 喜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. 岩石学报, 41(10): 3394~3414.

石洪召, 张林奎, 刘洪, 王艺云, 郭伟康, 付建刚. 2025. 西藏嘎波锂矿床白云母花岗岩及电气石地球化学: 对喜马拉雅后碰撞伸展背景下稀有金属成矿作用的启示. 沉积与特提斯地质, 45(3): 581~593.

汪灵, 党陈萍, 李彩侠, 王艳, 魏玉燕, 夏瑾卓, 潘俊良. 2014. 中国高纯石英技术现状与发展前景. 地学前缘, 21(5): 267~273.

汪灵. 2022. 高纯石英的概念及其原料品级划分. 矿产保护与利用, 42(5): 55~63.

王登红, 王岩, 陈郑辉, 黄凡, 杨刚. 2025. 试论高纯石英原料矿的找矿方向. 地球学报, 46(1): 8~14.

王冬兵, 秦雅东, 曾纪培, 罗亮, 唐渊, 曾孝文, 韩明明. 2024. 喜马拉雅东构造结早中新世隆升: 锆石和金红石 U-Pb 年龄约束. 沉积与特提斯地质, 44(4): 883~896.

王建平, 左鹏飞, 李开文, 方怀宾, 李晓宇, 张慧明, 黄业豪, 贺承广, 董一鸣. 2025. 东秦岭白岗岩型高纯石英矿床与美国斯普鲁斯派恩(Spruce Pine)成矿地质条件对比及成矿意义[J][OL]. 矿物学报: 1~10; <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2025.000000>

王九一. 2021. 全球高纯石英原料矿的资源分布与开发现状. 岩石矿物学杂志, 40(1): 131~141.

吴福元, 郭春丽, 胡方泱, 刘小驰, 赵俊兴, 李晓峰, 秦克章. 2023. 南岭高分异花岗岩成岩与成矿. 岩石学报, 39(1): 1~36.

吴福元, 刘小驰, 王佳敏, 陈厚彬, 胡方泱, 刘志超. 2025. 高分异花岗岩与高纯石英. 岩石学报, 41(10): 3243~3277.

吴福元, 刘志超, 刘小驰, 纪伟强. 喜马拉雅淡色花岗岩. 岩石学报, 2015, 31(1): 1~36.

夏梅, 杨晓勇, 邱月, Ibrar Khan, 蒋柏群, 侯振辉. 2025. 印度西北部 Aravalli—Delhi 造山带伟晶岩高纯石英原料矿石矿物学特征及提纯实验研究. 岩石学报, 41(10): 3415~3431.

夏宗强, 肖敏. 南岭南带河源地区花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义. 东华理工大学学报(自然科学版), 2024, 47(4): 349~361.

徐进鸿, 吴承泉, 张正伟, 李开文, 蔡志超, 李溪遥. 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. 岩石学报, 41(10): 3373~3393.

杨晓勇, 孙超, 曹荆亚, 施建斌. 2022. 高纯石英的研究进展及发展趋势. 地学前缘, 29(1): 231~244.

杨毅, 孙渺, 李晓霞, 史功文, 高轲, 王艺云, 马国桃, 董磊. 2025. 西藏柯月铅锌锡多金属矿床成因再认识: 对喜马拉雅后碰撞期铅锌锡成矿作用的启示. 沉积与特提斯地质, 45(3): 594~604.

张海敏, 张亮, 刘磊, 曹飞. 2022. 全球高纯石英资源开发利用现状及供需分析. 矿产保护与利用, 42(5): 49~54.

张洪瑞, 侯增谦. 2023. 大陆碰撞成矿作用: 深部动力学机制与成矿. 东华理工大学学报(自然科学版), 46(6): 525~536.

张进江, 杨雄英, 戚国伟, 王德朝. 2011. 马拉山穹窿的活动时限及其在藏南拆离系—北喜马拉雅片麻岩穹窿形成机制的应用. 岩

- 石学报, 27(12): 3535~3544.
- 张亮, 刘磊, 朱黎宽, 王红杰, 原娅斌. 2024. 关于高纯石英原料矿地质学评价方法的探讨. 岩石学报, 40(4): 1311~1326.
- 张亮, 朱黎宽, 李建国, 谭苏民, 万会, 庞大卫. 2025. 我国高纯石英资源勘查发现现状及思考. 中国矿业, 34(7): 8~17.
- 张志, 李光明, 张林, 焦彦杰, 王艺云, 马国桃, 夏祥标, 卿成实, 董磊, 杨毅. 2025. 初论喜马拉雅后碰撞伸展期与新生代花岗岩相关的稀有一锡钨—铅锌—金锦成矿系统: 以错那洞矿集区为例. 沉积与特提斯地质, 45(2): 375~393.
- 赵金洲, 张驰, 张森森, 王安书, 吴承泉, 张正伟. 2022. 东秦岭花岗岩伟晶岩中高纯石英矿物的可利用性研究. 矿物岩石地球化学通报, 41(6): 1305~130
- 赵武广, 李杨林, 杨志, 刘章龙, 李永兴, 张仕建, 杜佳辉, 李栋. 2025. 中国高纯石英资源供需现状与资源保障程度研究. 中国非金属矿工业导刊, 174(4): 6~10.
- 周浩阳. 2025. 高纯石英的矿床概念、矿床类型与资源评价. 岩石学报, 41(10): 3289~3301.
- 左秋霞, 刘加威, 陈健. 2022. 凤阳石英砂煅烧淬火—酸浸深度提纯及其动力学研究. 矿产保护与利用, 42(5): 75~81.
- Aoya M, Wallis S R, Kawakami, T Lee, J, and Wang Y. 2004. The Malashan metamorphic complex in southern Tibet: dominantly top to the north deformation and intrusive origin of its associated granites. *Himalayan Journal of Sciences*, 2(2): 92~93.
- Ballouard C, Elburg M A Tappe S, Reinke Christian, Ueckermann Henriette, Daggart Shane. 2020. Magmatic—hydrothermal evolution of rare metal pegmatites from the Mesoproterozoic Orange River pegmatite belt (Namaqualand, South Africa). *Ore Geology Reviews*, 116: 103252. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103252>.
- Bradley D, Shea E, Buchwaldt R, Bowring S, Benowitz J, O'Sullivan P, Mccauley A. 2016. Geochronology and tectonic context of lithium—cesium—tantalum pegmatites in the Appalachians. *The Canadian Mineralogist*, 54(4): 945~969. <https://doi.org/10.3749/canmin.1600035>.
- Burg J P, Chen G M. 1984. Tectonics and structural zonation of southern Tibet, China. *Nature*, 311(5983): 219~223.
- Chen Maosong, Xiang Xinkui, Zhan Gangle, Yin Qingqing, Yu Zhendong, Wang Tianchen, Xu Yumin, Tan Rong, 2020&. Geochronology, geochemical characteristics of the post-mineralization Late Yanshanian granite porphyry and its constraints for the terminal of the metallogeny in the No. 1 ore belt of the Dahutang district. *Journal of East China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 43(5): 401~416. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-3504.2020.05.001>.
- Du Feihu, Li Jingsheng, Li Xiaoxia, Zhang Zhizhen. 2011. Improvement of iron removal from silica sand using ultrasound-assisted oxalic acid. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18: 389~393.
- Duan Xiaoya, Hu Fangyang, Zhang Shaohua, Feng Zhanjiang, Liang Yong, Liu Yanhu, Wang Zhiqiang, Li Haibao, Yan Yinan. 2025&. Trace element compositions of quartz in granites and pegmatites from the Sanmudaimiao region, northern margin of the North China Craton and their implications for the formation of high-purity quartz. *Acta Petrologica Sinica*, 41(10): 3432~3452. <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2025.10.11>.
- Fu Jiangang, Li Guangming, Wang G H, et al. 2023. Geochemical Evidence for Genesis of Nb—Ta—Be Rare Metal Mineralization in Highly Fractionated Leucogranites at the Lalong Dome, Tethyan Himalaya, China. *Minerals*, 13(11): 1456.
- Fu Jiangang, Li Guangming, Guo Weikang, Dong Suiliang, Zhang Hai, Zhang Linkui, Liang Wei, Jiao Yanjie. 2023&. Mineral Geochemical Characteristics of Muscovite and Its Implication for Rare Metal Mineralization in Leucogranites in the Lalong Dome, Xizang, China. *Journal of East China University of Technology (Natural Science Edition)*, 6(6): 555~575. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-3504.2023.06.004>
- Gao Li'e, and Zeng Lingsen, 2012. Fluxed melting of metapelite and the formation of Miocene high-CaO two-mica granites in the Malashan gneiss dome, southern Tibet
- Gao Li'e, Zeng Lingsen, Hou Kejun, Guo Chunli, Tang Suohan, Xie Kejia, Hu Guyue, and Wang Li. 2013. Episodic crustal anatexis and the formation of Paiku composite leucogranitic pluton in the Malashan Gneiss Dome, Southern Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 58: 3546~3563. <https://doi.org/10.1007/s11434-013-5792-4>.
- Gao Li'e, Zeng Lingsen, Wang Li, Hou Kejun, Guo Chunli, Tang Suohan. 2013&. Age and formation mechanism of the Malashan high-Ca two-mica granite within the Northern Himalayan Gneiss Domes, southern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1995~2012.
- Gao Li'e, Zeng Lingsen, Zhao Linghao, Hou Kejun, Guo Chunli, Gao Jiaohao. 2021. Geochemical behavior of rare metals and high field strength elements during granitic magma differentiation: A record from the Borong and Malashan Gneiss Domes, Tethyan Himalaya, southern Tibet. *Lithos*, 106344, 398~399. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106344>.
- Gao Li'e, Zeng Lingsen, Hou Kejun, Guo Chunli, Tang Suohan, Xie Kejia, Hu Guyue, Wang Li. 2013a&. Episodic crustal anatexis and the formation of Paiku composite leucogranitic pluton in the Malashan Gneiss Dome, Southern Tibet. *Chin Sci Bull*, 2013, 58(27): 3546 - 3563, <https://doi.org/10.1007/s11434-013-5792-4>.
- Gao Shen, Zou Xinyu, Hofstra A, Qin Kezhang, Marsh E, Bennett M, Li Guangming, Jiang Jilian, Su Shiqiang, Zhao Junxing, and Li Zhenzhen. 2022. Trace elements in quartz: Insights into source and fluid evolution in magmatic—hydrothermal systems. *Economic Geology*, 117(6): 1415~1428; <https://doi.org/10.5382/econgeo.4943>
- Gao Shen, Zou Xinyu, Hofstra A, Qin Kezhang, Marsh E, Bennett M, Li Guangmin, Jiang Jilian, Su Shiqiang, Zhao Junxing, Li Zhenzhen. 2024. Influence of aluminium doping on high purity quartz glass properties. *Royal Society of Chemistry Advances*, 14(19): 13669~13675. .
- Götze J, Pan Yuanming, Müller A. 2021. Mineralogy and mineral chemistry of quartz: A review. *Mineralogical Magazine*, 85(5): 639~664.
- Guo Yilin, Chu Yang, Xia Ranran, Xue Zhenhua. 2025&. Deformation characteristics of the high-purity quartz bearing rocks in the Spruce Pine Area, USA. *Acta Petrologica Sinica*, 41(10): 3469~3489. <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2025.10.13>
- Han Guang, Wen Shuming, Wang Feng, Han Qicheng. &&2020. Selective adsorption mechanism of salicylic acid on pyrite surfaces and its application in flotation separation of chalcopyrite from pyrite. *Separation and Purification Technology*, 240, 116650.
- He Jiawei, Zhang Sensen, Liu Bo, Sun Hongjuan, Wang Zhenxuan, Peng Tongjiang. 2025&. A comparative study of process mineralogical characteristics and purification technologies for the

- high-purity quartz raw material of granitic pegmatites. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, <https://doi.org/10.3724/j.issn.1007-2802.20250038>. (online).
- Hu Huan, Wang Rucheng, Xie Lei, Xu Kexin, Dong Shaochun. 2025. Mineralogical characteristics of feldspar and mica in Spruce Pine, Alaskite, USA: Implications for the high-purity quartz raw material deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 41(10): 3453~3468. <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2025.10.12>
- Jenning, A, Senior, A, Guerin, K, et al. 2024. A review of high-purity quartz for silicon production in Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 71(8): 1085~1099.
- Jiang Xuesong, Chen Jian, Ban Boyuan, Song Wangfeng, Chen Chen, Yang Xiaoyong. 2022. Application of competitive adsorption of ethylenediamine and polyetheramine in direct float of quartz from quartz feldspar mixed minerals under neutral pH conditions. *Minerals Engineering*. 188, 107850. <https://doi.org/10.1016/j.ultronch.2010.07.006>.
- Jiao Yanjie, Zhang Zhi, Dong Lei. 2023. Underlying Structure of the Zhaxikang Deposit in Xizang Revealed by Three-dimensional Electrical Data. *Journal of East China University of Technology (Natural Science Edition)*, 46(6): 576~584. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-3504.2023.06.005>.
- Lee J, Hacker B, Wang Yu. 2004. Evolution of North Himalayan gneiss domes: structural and metamorphic studies in Mabja Dome, southern Tibet. *Journal of Structural Geology*, 26(12): 2297~2316. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2004.02.013>.
- Li Kaiwen, Wang Jianping, Zhang Zhengwei, Chai Jianyu, Liu Xiaochi, Fang Huaibin, Huang Yehao. 2025. Main types, distribution patterns, and prospecting targets of high-purity quartz deposits in East Qinling, China. *Acta Petrologica Sinica*, 41(10): 3321~3339. <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2025.10.05>.
- Li Xiaoyu, Wang Jianping, Hu Tianyang, Cai Zhichao, Chai Jianyu, Zuo Pengfei, Liu Xiaochi. 2025. Petrogenesis of the Piaoichi composite granite in East Qinling and its implications for high-purity quartz mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 41(10): 3340~3358. <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2025.10.06>.
- Liu Hong, Huang Hanxiao, Zhang Zhi, Li Guangming, Ouyang Yuan, Zhang Linkui, Wu Jianyang, Huang Yong, Cao Huawen, Zhang Tengjiao, Zhang Jinghua, Li Fu Dai Zuowen, Li Hongliang, Lan Shuangshuang, Xiang Anping, Lü Menghong, Liu Xiao, Zhou Jin, Shi Hongzhao, Yu Huai, Zhang Hongming. 2025. Study on the Porphyry—Epithermal Copper—Gold—Polymetallic Mineralization and Prospecting Prediction in the Western Gandise Metallogenic Belt, Xizang. Wuhan: China University of Geosciences Press; 1~127.
- Liu Zhicha, Wu Fuyuan, Ding Lin, et al. 2019. Mineralogical evidence for fractionation processes in the Himalayan leucogranites of the Ramba Dome, southern Tibet. *Lithos*, 340~341: 71~86.
- Liu Zhichao, Wang Jiamin, Lan Tingguang, Zhang Shaohua, Liu Xiaochi, Wu Fuyuan. 2025. The potential for high-purity quartz mineralization and the exploration direction of the Himalayan leucogranites and associated rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 41(10): 3394~3414. <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2025.10.09>.
- London D, Morgan G B, Loomis J L, Paul K A, Guttery B M. 2012. Internal evolution of miarolitic granitic pegmatites at the Little Three Mine, Ramona, California, USA. *The Canadian Mineralogist*, 50(4): 1025~1054.
- Müller A, Kirwin D, Seltmann R. 2023. Textural characterization of unidirectional solidification textures related to Cu—Au deposits and their implication for metallogenesis and exploration. *Mineralium Deposita*, 58(7): 1211~1235.
- Pan Xiaodong, Li Suqin, Li Yongkui. 2022. Resource, characteristic, purification and application of quartz: A review. *Minerals Engineering*. 183, 107600.
- Shi Hongzhao, Zhang Linkui, Liu Hong, Wang Yiyun, Guo Weikang, Fu Jiangang. 2025. Geochemical characteristics of tourmaline—muscovite granite and tourmaline from the Gabo lithium deposit, Xizang: Implications for rare metal metallogenesis in the post-collision extensional setting of the Himalayas. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 45(3): 581~593. <https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2025.07006>.
- Thigpen J R, Moecher D P, Stowell H H, Merschat A, Hatcher Jr R D, Powell N E, Spencer B M, Mako C A, Bollen E M, and Kylander-Clark A. 2022. Defining the timing, extent, and conditions of Paleozoic metamorphism in the southern Appalachian Blue Ridge terranes of Tennessee, North Carolina, and northern Georgia. *Tectonics*, 41(10): e2022TC007406. <https://doi.org/10.1029/2022TC007406>.
- Tuncuk A, Akcil A. 2016. Iron removal in production of purified quartz by hydrometallurgical process. *Int. J. Miner. Process*, 153: 44~50.
- Wang Denghong, Wang Yan, Chen Zhenghui, Huang Fan, Yang Gang. 2025. Discussion on the Prospecting Direction of High-purity Quartz Deposit. *Acta Geoscientia Sinica*, 46(1): 8~14.
- Wang Dongbing, Qin Yadong, Zeng Jipei, Luo Liang, Tang Yuan, Zeng Xiaowen, Han Mingming. 2024. Early Miocene uplift of the eastern Himalayan syntaxis: Constraints from U-Pb ages of zircon and rutile. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 44(4): 883~896. <https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.11008>.
- Wang Jianping, Zuo Pengfei, Li Kaiwen, Huang Yehao, Fang Huaibin, He Chengguang, Li Xiaoyu, Dong Yiming, Zhang Huiming. 2025. A comparative study of metallogenic geological conditions of the high-purity quartz deposits in East Qinling, China and Spruce Pine, USA, and its significance [J]. *Acta Mineralogica Sinica*; 1~10; <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2025.000000>.
- Wang Jiuyi. 2021. Global high purity quartz deposits: Resources distribution and exploitation status. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 40(1): 131~141.
- Wang Ling, Dang Chenping, Li Caixia, Wang Yan, Wei Yuyan, Xia Jinzhuo, Pan Junliang. 2014. Technology of high-purity quartz in China: Status quo and prospect. *Earth Science Frontiers*, 21(5): 267~273.
- Wang Ling. 2022. Concept of high purity quartz and classification of its raw materials. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 42(5): 55~63. <https://doi.org/10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.05.009>.
- Wu Fuyuan, Guo Chunli, Hu Fangyang, Liu Xiaochi, Zhao Junxing, Li Xiaofeng, Qin Kezhang. 2023. Petrogenesis of the highly fractionated granites and their mineralizations in Nanling Range, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 39(1): 1~36. <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2023.01.01>.
- Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Wang Jiamin, Chen Houbin, Hu Fangyang, Liu Zhichao. 2025. Highly fractionated granite and high-purity

- quartz. *Acta Petrologica Sinica*, 41(10): 3243~3277. <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2025.10.01>
- Wu Fuyuan, Liu Zhichao, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang. 2015&. Himalayan leucogranite: Petrogenesis and implications to orogenesis and plateau uplift. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 1~36.
- Xia Mei, Yang Xiaoyong, Hou Zhenhui. 2024. Preparation of high-purity quartz sand by vein quartz purification and characteristics: A case study of Pakistan vein quartz. *Minerals*, 14: 727. <https://doi.org/10.3390/min14070727>
- Xia Mei, Yang Xiaoyong, Qiu Yue, Khanlbrar, Ang Boqun, Hou Zhenhui. 2025&. Mineralogical characteristics and purification of high-purity quartz from pegmatites in the Aravalli—Delhi orogenic belt, NW India. *Acta Petrologica Sinica*, 41(10): 3415~3431. <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2025.10.10>.
- Xia Zongqiang, Xiao Min. 2024&. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology, geochemistry, and geological significance of granite in the Heyuan area, southern Belt of Nanling Region. *Journal of East China University of Technology (Natural Science Edition)*, 47(4): 349~361. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-3504.2024.04.005>.
- Xu Jinhong, Wu Chengquan, Zhang Zhengwei, Li Kaiwen, Cai Zhichao, Li Xiyao. 2025&. Structural zoning and high-purity quartz of granitic pegmatite from the Longquanping area in the East Qinling: Constraints from mineralogy, chronology, and geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 41(10): 3373~3393. <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2025.10.08>.
- Yang Changqiao, Li Suqin, Yang Ruiming, Bai Jianxin; Guo Zijie. 2018. Recovery of silicon powder from kerf loss slurry waste using superconducting high gradient magnetic separation technology. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 20, 937~945. <https://doi.org/10.1007/s10163-017-0656-7>
- Yang Xiaoyong, Sun Chao, Cao Jingya, Shi Jianbin, 2022&. High purity quartz; Research progress and perspective review. *Earth Science Frontiers*, 29(1): 231~244.
- Yang Yi, Sun Miao, Li Xiaoxia, Shi Gongwen, Gao Ke, Wang Yiyun, Ma Guotao, Dong Lei. 2025&. A reevaluation for the genesis of the Keyue Pb—Zn—Sb polymetallic deposit: Insights for Pb—Zn—Sb metallogenesis during the post-collisional Tethys Himalayan belt[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 45(3): 594~604. <https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2025.07004>.
- Zhang Haiqi, Zhang Liang, Liu Lei, Cao Fei. 2022&. Development, utilization, supply and demand of global high purity quartz resources: a systematic review and meta-analysis. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 42(5): 49~54. <https://doi.org/10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.05.008>.
- Zhang Hongrui, Hou Zengqian. 2023&. Metallogenesis within Collisional Orogen: The Deep Dynamics and Formation of Mineral Deposits. *Journal of East China University of Technology (Natural Science Edition)*, 46(6): 525~536. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103252>.
- Zhang Jinjiang, Santosh M, Wang Xiaoxian, Guo Lei, Yang Xiongying, Zhang Boa. 2012. Tectonics of the northern Himalaya since the India - Asia collision. *Gondwana Research*, 21(4): 939~960.
- Zhang Jinjiang, Yang Xiongying, Qi Guowei, Wang Dechao. 2011&. Geochronology of the Malashan dome and its application in formation of the Southern Tibet detachment system (STDS) and Northern Himalayan gneiss domes (NHGD). *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3535~3544.
- Zhang Liang, Liu Lei, Zhu Likuan, Wang Hongjie, Yuan Yabin. 2024&. Discussion on the geological evaluation for high purity quartz raw material. *Acta Petrologica Sinica*, 40(4): 1311~1326. <https://doi.org/https://doi.org/10.18654/1000-0569/2024.04.16>.
- Zhang Liang, Zhu Likuan, Li Jianguo, Tan Xiumin, Wan Hui, Pang Dawei. 2025&. The situation and thoughts on the exploration and development of high-purity quartz resources in China. *China Mining Magazine*, 2025, 34(7): 8~17. <https://doi.org/https://doi.org/10.12075/j.issn.1004-4051.20250374>.
- Zhang Zhi, Li Guangming, Zhang Lin, Jiao Yanjie, Wang Yiyun, Ma Guotao, Xia Xiangbiao, Qing Chengshi, Dong Lei, Yang Yi, 2025&. The rare metals—tin—tungsten—lead—zinc—gold—antimony metallogenic system associated with Cenozoic granites during the post-collision extension period in Himalaya: A case study of Cuonadong ore concentration area. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 45(2): 375~393. <https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2025.04004>.
- Zhao Jinzhou, Zhang Chi, Zhang Sensen, Wang Anshu, Wu Chengquan, Zhang Zhengwei. 2022#. Availability of high-purity quartz minerals in granitic pegmatites from the Eastern Qinling. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 41(6): 1305~1320.
- Zhao Wuguang, Li Yanglin, Yang Zhi, Liu Zhanglong, Li Yongxing, Zhang Shijian, Du Jiahui, Li Dong. 2025#. The supply and demand status and resource guarantee degree of high-purity quartz in China. *China Non-Metallic Minerals Industry*, 174(4): 6~10.
- Zhong Lele, Lei, Shao Min, Wang Enwen, Pei Zhenyu, Li Liang, Yang Yayun. 2013. Research on removal impurities from vein quartz sand with complexing agents. *Appl. Mech. Mater.* 2013, 454, 194~199. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.454.194>. Zhou Haoyang. 2025&. Geological definition, deposit types and resource assessment of high-purity quartz. *Acta Petrologica Sinica*, 41(10): 3289~3301. <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2025.10.03>.
- Zhong Taosheng, Yu Wenhe, Shen Can, and Wu Xiaowen. 2022. Research on preparation and characterisation of high-purity silica sands by purification of quartz vein ore from Dabie mountain. *Silicon*, 14(9): 4723~4729 <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01217-x>.
- Zhou Haoyang, Müller A, Berndt J. 2023. Quartz chemistry fingerprints melt evolution and metamorphic modifications in high-purity quartz deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 356: 179~195.
- Zuo Qiuxia, Liu Jiawei, Chen Jian. 2022&. Study on calcination and quenching—acid leaching of fengyang quartz sand for deep purification and its kinetics. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 42(5): 75~81. <https://doi.org/10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.07.013>.

Evaluation of quartz purification and potential for high-purity quartz mineralization in Malashan two-mica granite, north Himalayan

LIU Hong^{1, 2, 3, 4)}, LI Wenchang^{1, 2, 3, 5)}, LI Guangming^{1, 2, 3)}, HOU Lin^{1, 2, 3, 4)},
LI Xuanzhi^{1, 6)}, FU Jiangang¹⁾, MAO Xingxing^{1, 4)}, FAN Bo^{1, 4)}, GUO Weikang¹⁾

1) *Chengdu Center, China Geological Survey (Southwest China Innovation Center for Geosciences), Chengdu, 610218;*

2) *Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, 430074;*

3) *College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059;*

4) *College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong, 266590;*

5) *Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650093;*

6) *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083.*

Objectives: High-purity quartz is a critical raw material for strategic emerging industries such as semiconductors and photovoltaics, yet the supply of its high-grade feedstock remains at risk. The North Himalayan Belt hosts the world's largest Cenozoic leucogranite belt, which holds theoretical potential for hosting alaskite—granite-type high-purity quartz deposits. However, systematic mineralogical studies and experimental validation of purification methods have been lacking. This study aims to clarify the mode of occurrence of impurities and the purification feasibility of quartz from the Malashan two-mica granite through detailed characterization and systematic experiments, and to evaluate its resource potential.

Methods: Quartz from the Malashan two-mica granite was selected for investigation. Analytical techniques including polarized light microscopy, scanning electron microscopy (SEM), and Raman spectroscopy were employed for mineralogical and fluid inclusion analysis. A comprehensive purification process—"crushing, flotation, calcination—water quenching, mixed-acid leaching, and chlorination roasting"—was applied. The concentrations of 15 key impurity elements in quartz sand before and after purification were quantitatively analyzed using ICP-MS.

Results: (1) The primary fluid inclusion content in quartz is extremely low, with secondary inclusions dominating, suggesting that parental magma evolution stagnated prior to extensive fluid exsolution; (2) systematic purification increased quartz SiO₂ purity from 99.8969% to 99.9942% (4N4 grade). Flotation and acid leaching effectively removed mineral inclusions such as coexisting feldspar and mica, while chlorination roasting significantly reduced lattice-bound Li and Na; (3) the main residual impurities in the final product—Al (43.3×10^{-6}), Ti (8.03×10^{-6}), and Li (1.69×10^{-6})—are present in the quartz lattice via isomorphism and are difficult to remove completely using conventional processes under current economic and technical conditions.

Conclusions: The quartz from the Malashan two-mica granite possesses the mineralogical foundation for forming alaskite—granite-type high-purity quartz. This study confirms that leucogranites within the North Himalayan Belt characterized by "high differentiation, low fluid exsolution, metamorphic—deformational overprinting, and absence of metallic mineralization" represent favorable targets for exploring this type of high-purity quartz resource. The findings provide a new prospecting direction for China to overcome bottlenecks in the supply of high-end quartz resources.

Keywords: Qinghai—Xizang Plateau; Tibetan Plateau; highly differentiated; leucogranite; alaskite; high-purity quartz

Acknowledgements: During the writing of this paper, we received guidance and assistance from Professor

Yang Xiaoyong of the University of Science and Technology of China and Postdoctoral Researcher Xia Mei, as well as Senior Engineer Zhu Likuan of the Zhengzhou Institute of Comprehensive Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences. The reviewers and editorial board members provided valuable suggestions for improving the manuscript. We hereby express our sincere gratitude to all of them.

First author: LIU Hong, born in 1987, male, Ph. D., senior engineer (professor level), and Master's supervisor, is mainly engaged in mineral deposit geology and mineral exploration; Email: liuh@mail.cgs.gov.cn

Corresponding author: LI Wenchang, born in 1962, male, Ph. D., professor, doctoral supervisor, is mainly engaged in mineral exploration and mineral deposit geology; Email: lwcyndd@163.com

Manuscript received on: 2025-11-10; Accepted on: 2026-01-20; Published online on: 2026-02-15

Doi: 10.16509/j.georeview.2026.02.015

Edited by: ZHANG Yuxu

