

大别山硬玉石英岩: 一种高品质的新型高纯石英原料矿

章军锋*, 刘鹏雷*, 曾竑堃, 梁政强, 刘文龙, 金振民

中国地质大学(武汉)地球与行星科学学院, 地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074

* 联系人, E-mail: jfzhang@cug.edu.cn; liupenglei@cug.edu.cn

2026-01-07 收稿, 2026-02-05 修回, 2026-02-14 接受, 2026-02-14 网络版发表

国家重点研发计划(2023YFF0804100)、地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(2025ZD1005500)和湖北省自然科学基金(2025AFB454)资助

摘要 高纯石英是半导体、光伏等战略性新兴产业的关键基础材料, 其资源保障对国家经济发展和科技安全具有重要意义。本研究发现大别山超高压变质带中产出的硬玉石英岩是一种新型高品质高纯石英原料矿。通过系统采样和石英原位微量元素分析, 发现其石英杂质含量很低。总杂质元素平均含量为11.8~22.4 ppm, 关键杂质元素Al和Ti的平均含量分别为2.8~7.5和2.6~3.6 ppm, 接近或优于国际主流高端高纯石英砂产品。研究揭示, 硬玉石英岩中石英的高纯特性与现存柯石英退变质过程中, 高压中温(1.8~2.8 GPa和630~700°C)、贫流体条件下石英的结晶和生长密切相关。这一发现为我国高纯石英资源的找矿方向提供了新思路, 有望成为保障国家高纯石英砂生产的重要战略性资源。

关键词 高纯石英, 硬玉石英岩, 微量元素, 高压中温退变质

高纯石英砂是半导体、光伏、光纤和高端光源等高新技术产品不可或缺的关键基础原料, 在电子信息、新材料、新能源等战略性新兴产业, 以及航空航天领域具有不可替代的重要作用^[1,2]。随着相关产业的迅猛发展与急剧扩张, 高纯石英砂已成为世界稀缺和中国短缺的战略性关键资源。中国虽已具备高纯石英砂的生产能力, 但高纯石英原料矿和高端石英砂产品仍主要依赖进口^[3], 解决高纯石英砂短缺问题的关键是找到可用于生产高纯石英砂产品的高品质高纯石英原料矿。

2025年4月自然资源部将高纯石英确定为我国第174号新矿种, 具体是指经选矿、提纯后二氧化硅纯度 $\geq 99.995\%$ (Al、Ti、B、Ca、Cr、Cu、Fe、K、Li、Mg、Mn、Na、Ni、P、Zn等杂质元素总含量 ≤ 50 ppm), 且杂质、包裹体含量以及粒度能满足半导体、光伏、光学等高新领域应用要求的矿石。Müller等

人^[4]提出的高纯石英标准, 除了满足晶格杂质元素总量 ≤ 50 ppm的要求外, 还对不同杂质元素的含量提出了进一步的限定, 即Al < 30 ppm, Ti < 10 ppm, Na < 8 ppm, K < 30 ppm, Li < 5 ppm, Ca < 5 ppm, Fe < 3 ppm, P < 2 ppm, B < 1 ppm, 其余如Mg、Ge等元素含量低于数个ppm。亦有学者按照纯度将高纯石英分为低纯或低端($\text{SiO}_2 \geq 99.9\%$, 3N)、中纯或中端($\text{SiO}_2 \geq 99.99\%$, 4N)、高纯或中高端($\text{SiO}_2 \geq 99.995\%$, 4N5)、超高纯或高端($\text{SiO}_2 \geq 99.998\%$, 4N8)四类^[2,5]。

目前全球高纯石英矿床主要分为白岗岩型、花岗伟晶岩型和热液脉型^[4-6]。其中, 白岗岩型以美国Spruce Pine矿床为代表^[7], 花岗伟晶岩型则以挪威Tysfjord的Nb-Y-F伟晶岩群为典型^[8,9], 二者共同构成全球高纯石英砂产品的主要原料矿。热液脉型如俄罗斯南乌拉尔地区Chelbybinsk西北部的石英脉, 虽纯度较高, 但规模有限^[10]。依托本土的这些优质原料矿, 美国、挪威、俄

引用格式: 章军锋, 刘鹏雷, 曾竑堃, 等. 大别山硬玉石英岩: 一种高品质的新型高纯石英原料矿. 科学通报, 2026, 71: 2524–2534

Zhang J, Liu P, Zeng H, et al. Jadeite quartzite in the Dabie ultra-high-pressure metamorphic belt: a novel high-grade high-purity quartz resource (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 2524–2534, doi: [10.1360/CSB-2026-0037](https://doi.org/10.1360/CSB-2026-0037)

罗斯分别建立了能稳定生产纯度 $\geq 99.998\%$ (4N8)和 99.999% (5N)高纯石英砂产品的能力(表S1)。

尽管我国在河南东秦岭、新疆阿尔泰等地已探明部分白岗岩型、伟晶岩型及热液脉型高纯石英矿,但总体储量有限,纯度波动较大^[11,12],制约了我国在该领域的自主发展能力。另外,我国虽已实现4N8级别高纯石英砂的量产能力,但高品质原料仍主要依赖进口,存在较大供给安全风险^[3]。在当前对高纯石英需求日益增长的形势下,勘探和开发更多的高纯石英矿,特别是高品质的高纯石英矿具有特别重大的意义。

前人研究表明,石英岩作为由石英砂岩、硅质岩等变质形成的岩石,亦具备成为高纯石英资源的良好潜力^[13,14],但目前该类型高纯石英矿资源在国际和国内的勘探和开发程度低,认识不深。本文通过对中国大别山超高压变质带中产出的硬玉石英岩进行系统的矿物学研究发现,该类岩石中石英纯度高、成分稳定、包裹体稀少,是一种高品质的新型高纯石英原料矿,且资源储量前景巨大,有望成为保障国家高纯石英砂,特别是高端高纯石英砂生产的重要战略性资源。

1 大别山超高压变质带及其中的硬玉石英岩

横跨中国中东部的大别-苏鲁造山带形成于三叠纪时期扬子板块的北向俯冲及同华北板块之间的相互碰撞,含有世界上出露面积最大的超高压变质带^[15]。该造山带被NNE向左行走滑的郯庐断裂切割为东西两部分^[16],其中西段为大别山。大别山自北向南分为五个明显不同的变质构造单元(图1(a)):北淮阳绿片岩相单元、北大别高温麻粒岩相单元、中大别中温-超高压榴辉岩相单元,南大别低温榴辉岩相单元以及宿松蓝片岩相单元^[17]。中大别超高压变质单元由变质基底和变质沉积盖层组成:变质基底以花岗质片麻岩为主体,变质沉积盖层主要由各类副片麻岩构成^[18]。在变质沉积盖层中,断续产出有大理岩-钙质硅酸盐岩和硬玉石英岩等,且每类岩石中均有规模不等的榴辉岩体分布(图1(b))。

作为本研究的主要研究对象,大别山超高压变质带中的硬玉石英岩最早由翟明国等发现并报道^[19]。这类岩石在双河、新建和菖蒲等地出露较好,地表出露总面积约为 47 km^2 (图2)。一般认为硬玉石英岩的原岩是钠长石化的粉砂岩^[19-22],沉积物源可能来自古元古代中期的花岗岩类^[23]。已有的变质演化研究显示,硬玉

石英岩主要记录了两阶段的演化历史:峰期超高压变质阶段(压力 $2.8\sim 3.0\text{ GPa}$,温度 $660\sim 700^\circ\text{C}$)和退变质角闪岩相阶段(压力 $0.5\sim 1.0\text{ GPa}$,温度 $500\sim 600^\circ\text{C}$)^[22,24],其中峰期超高压变质年龄在 $235\sim 225\text{ Ma}$ 之间^[23,25]。

2 研究方法

本次研究在大别山双河、新建和菖蒲三个地区的多个露头点(图2)累计随机采集样品二十余块。每块标本均磨制成 $30\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ 厚度的探针片,先后采用光学显微镜和阴极发光技术进行观察,相关工作在中国地质大学(武汉)地球科学学院实验室完成。其中阴极发光图像的采集使用CITL CL8200MK52型显微阴极发光仪完成,具体工作参数如下:电压 15 kV 、电流 300 A 、功率 150 W 、束流 1 mA 、束斑直径 $30\text{ }\mu\text{m}$ 、曝光时间 20 s 。

石英原位微量元素成分分析在中国科学院地球化学研究所完成,采用NWR femto UC飞秒激光剥蚀系统和Agilent 7900质谱仪,分析方法详见蓝廷广等人^[26]。激光剥蚀过程中采用氦气为载气,氩气为补偿气,并加入少量氮气提高分析灵敏度。在测试之前使用硅酸盐玻璃NIST SRM 610对ICP-MS性能进行优化,以使仪器达到最佳灵敏度和电离效率($U/\text{Th}\approx 1$)、尽可能小的氧化物产率($\text{ThO}/\text{Th}<0.3\%$)和低背景值。分析过程中,激光剥蚀束斑直径为 $50\text{ }\mu\text{m}$,剥蚀频率为 6 Hz ,激光能量在百分比模式下调整为 100% 。每次分析包括 20 s 的背景和 40 s 的样品信号采集。元素含量采用多外标校正的总量归一化法,利用软件ICPMSDataCal完成^[27]。在标样选择方面,本研究采用NIST SRM 610和SRM 612作为标准物质,具体分析流程为:每分析10次样品后,分别进行2次SRM 610和1次SRM 612分析。石英标样QZ-2被用来监测数据质量。标准物质中微量元素含量的分析结果见表S2,其推荐值参考GeoReM数据库(<http://georem.mpchmainz.gwdg.de/>)。标样QZ-2的分析结果(单位为ppm)为: $\text{Al}=182\pm 43$, $\text{Ti}=17.4\pm 1.1$, $\text{Li}=20.2\pm 1.7$, $\text{Be}=0.43\pm 0.21$, $\text{B}=2.20\pm 1.16$, $\text{Ge}=2.57\pm 0.24$ ($N=14$; $\pm 1\sigma$; 表S3)。除Ge略微偏高外,其他元素含量在误差范围内同推荐值一致($\text{Al}=179\pm 9$, $\text{Ti}=16.0\pm 1.5$, $\text{Li}=17.6\pm 0.4$, $\text{Be}=0.54\pm 0.04$, $\text{B}=1.34\pm 0.57$, $\text{Ge}=1.71\pm 0.05$)。分析结果表明多数元素的分析准确度优于 10% 。需要说明的是,本研究重点分析了石英中Al、Ti、Li、Be、B、Na、Mg、Cr、Mn、Ni、Cu、Ge和Zr这13种杂质元素。由于激光剥蚀分析方法的背景值偏高,本研究未对

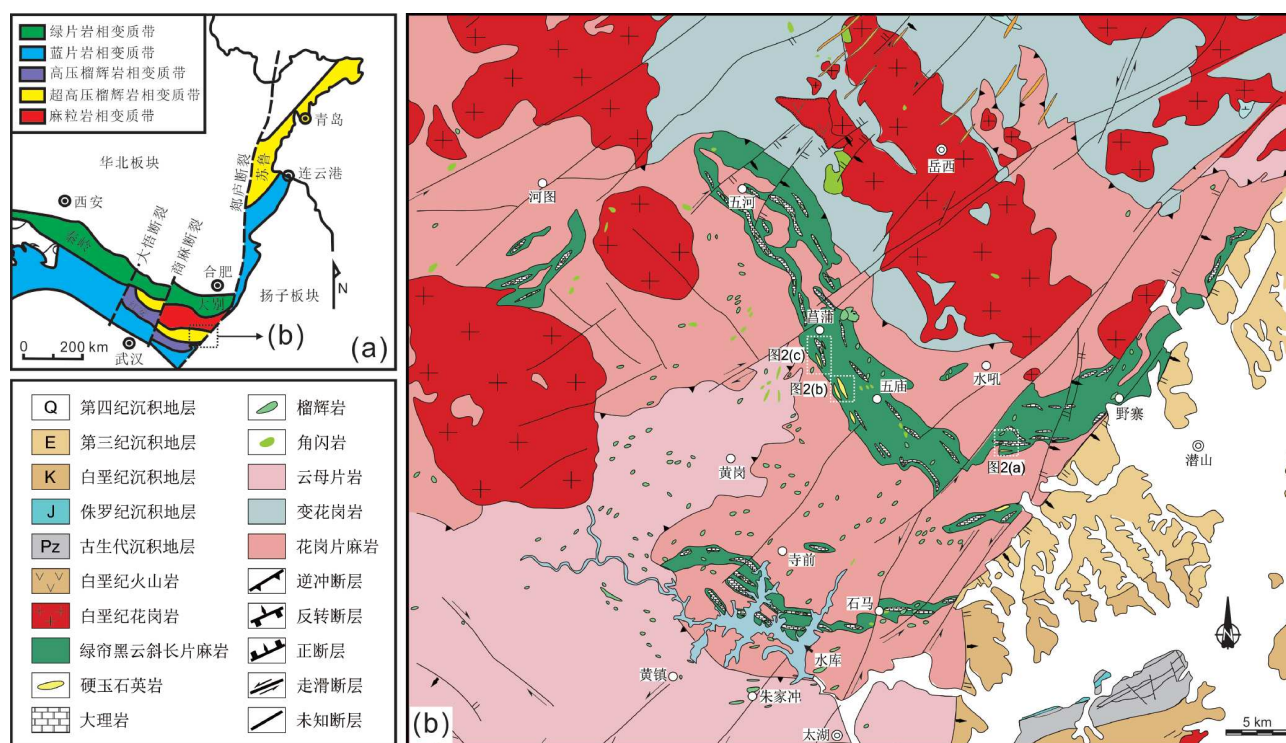


图1 区域地质图。(a) 大别-苏鲁造山带地质简图, 据文献[17]修改。(b) 大别山超高压变质带地质图(石永红提供), 据安徽省安庆市太湖县幅1:250000地质图修改

Figure 1 Regional geological maps. (a) Simplified geological map of the Dabie-Sulu orogenic belt, modified after Ref. [17]. (b) Geological map of the Dabie ultrahigh-pressure metamorphic belt (courtesy of Shi Yonghong), modified from the 1:250000 geological map of Taihu County, Anqing City, Anhui Province

K、Ca、Fe和P这四种杂质元素进行定量测定。考虑到石英中这几种杂质元素的含量一般都非常低^[28], 这应该不会对本文的分析结果产生显著影响。

3 样品特征和分析结果

大别山超高压硬玉石英岩多呈块状构造, 中细粒变晶结构(图3(a, b))。该类岩石主体由石英和硬玉两种矿物组成, 部分样品含有少量石榴子石和多硅白云母, 副矿物为金红石、锆石、独居石和磷灰石(图3(b~e))。硬玉和石榴子石含有柯石英及其假象包裹体(图3(c))。不同样品经历了不同程度角闪岩相退变质作用的叠加改造: 硬玉和石榴子石被霓辉石和角闪石+斜长石+磁铁矿后成合晶取代(图3(c~e)), 多硅白云母则被黑云母+斜长石后成合晶取代^[24]。

石英在硬玉石英岩中的体积含量为30%~60%(图3(b)), 颗粒多呈近等轴粒状, 粒径介于0.1~1 mm之间, 变形较弱, 有时可见波状消光(图3(c~f))。石英中矿物包裹体非常少见, 仅少数颗粒含有沿愈合裂隙分布的

次生流体包裹体(图3(g))。在本次镜下分析的二十多块样品中, 仅发现一块样品内的石英含有较多的次生流体包裹体(图S1(a, b))。这些次生流体包裹体主要为气液两相(图3(h))。阴极发光图像显示, 石英颗粒的阴极发光强度很弱, 未见环带等成分分区结构(图3(i))和S1(c, d))。

本次研究共分析了来自三个地区10个硬玉石英岩样品的石英微量元素成分, 其中双河地区3个(YW-4-3、HCC-1、HCC-2)、新建地区3个(XJ-1-2、XT-8、XT-12)和菖蒲地区4个(CP-5-1、PWL-1、PWL-8、PWL-3a)。由于XT-8和XT-12采自同一露头, 后续将二者合并为同一个样品(XT-8/12)进行讨论。

本研究发现大别山硬玉石英岩中石英的杂质元素主要为Al、Na、Ti、B和Ge这5种元素, Li、Be、Mg、Cr、Mn、Ni、Cu和Zr的含量普遍低于或接近检出限(各自的检出限范围依次为0.05~0.25、0.02~0.16、0.06~0.38、0.4~1.5、0.7~2.8、0.25~1.4、0.09~0.37、0.01~0.06 ppm)(表S4)。因此, 下文将主要围绕Al、Na、

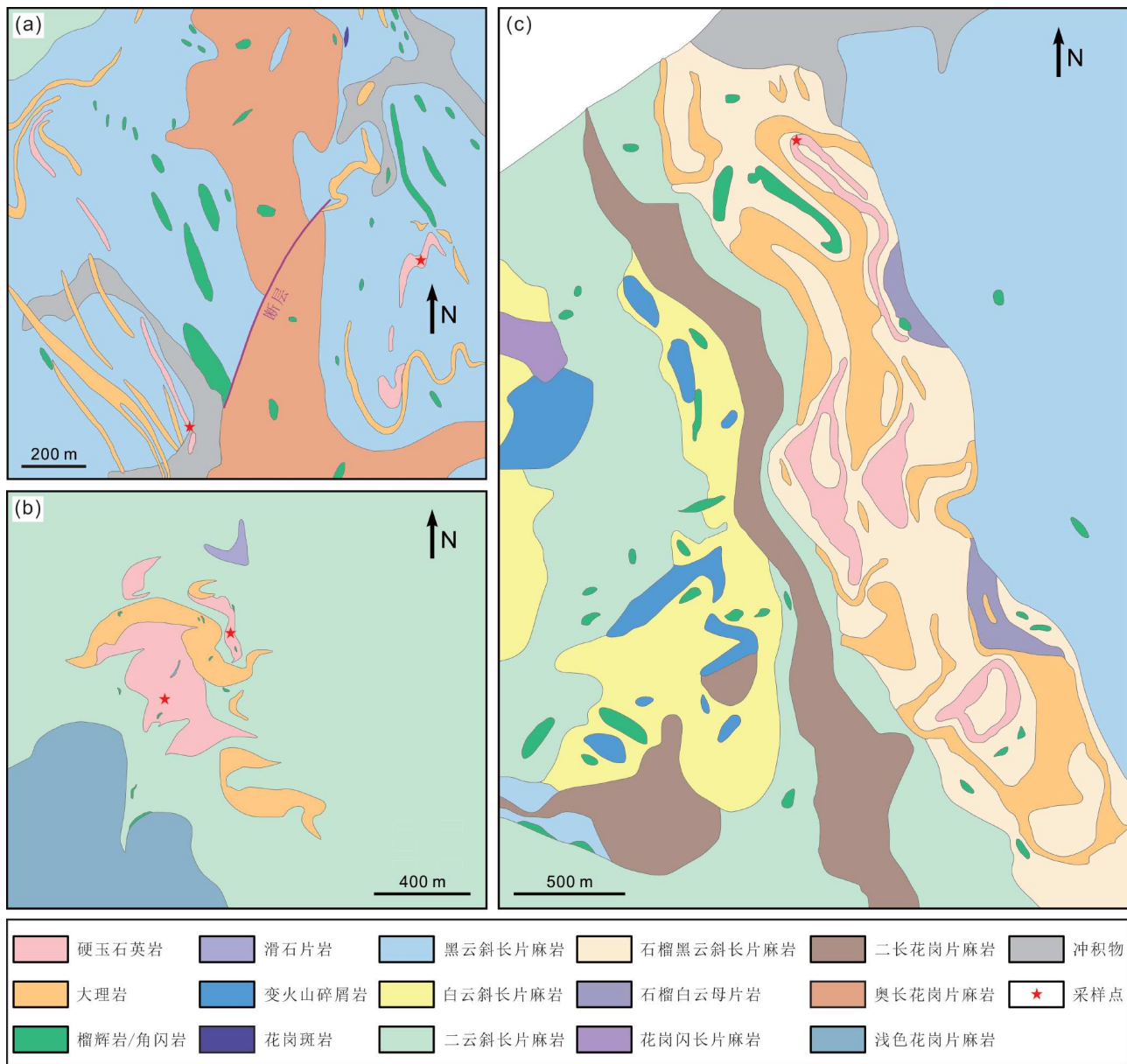


图 2 大别山双河(a)、新建(b)和菖蒲(c)地区地质图, 据文献[20,21]修改. 红色五角星标示采样位置

Figure 2 Simplified geological maps of the Shuanghe (a), Xinjian (b), and Changpu (c) areas in the Dabie Mountains, modified after Refs. [20,21]. Red stars indicate the sampling locations

Ti、B和Ge的含量进行品质评价. 此外, 当某一元素含量低于检出限时, 在计算平均值、杂质元素总含量以及投图(图4和5)时, 均采用其对应的检出上限作为该元素含量进行保守评价.

三个地区样品中的石英表现出相似的Ti、B和Ge含量分布范围(表S1): Ti, 2~4 ppm(平均2.6~3.6 ppm); B, 0.2~1.2 ppm(平均0.5~0.8 ppm); Ge, 0.2~0.7 ppm(平均0.3~0.5 ppm)(图4(c~e)和5(d~f)). 然而, 杂质元素总含

量及Al、Na的含量在不同地区和/或样品之间则存在稍许差异(图4(a, b)和5(a~c)).

双河地区三个样品YW-4-3、HCC-1、HCC-2中石英的杂质元素总含量及Al、Na的含量比较稳定. 杂质元素总含量分别为7.9~21.6 ppm(平均11.8±3.7 ppm)、9.7~19.5 ppm(平均14.3±2.9 ppm)、8.2~18.4 ppm(平均12.8±3.0 ppm). Al含量分别为1.3~7.7 ppm(平均3.0±1.8 ppm)、2.1~7.1 ppm(平均4.8±

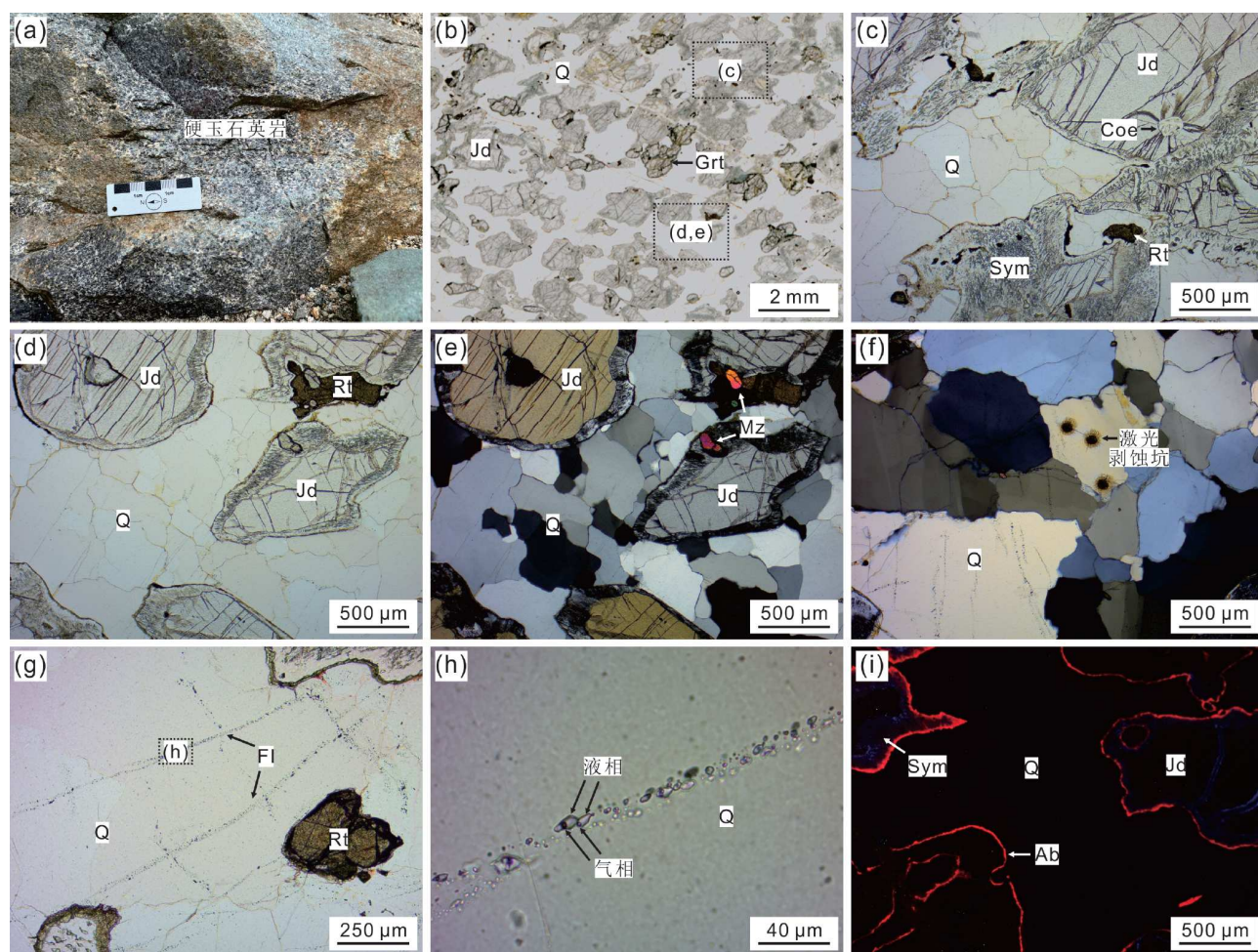


图 3 大别山超高压硬玉石英岩的野外及显微特征。(a) 菖蒲地区出露的灰绿色块状硬玉石英岩, 野外照片。(b) 菖蒲样品PWL-3a主要由石英、硬玉和石榴子石组成, 薄片扫描图, 单偏光。(c) 硬玉中发育柯石英包裹体, 局部被霓辉石及角闪石+斜长石后成合晶取代, 单偏光。(d, e) 石英呈细粒花岗变晶结构, 包裹体少见, 分别为单偏光和正交偏光。(f) 双河样品HCC-1中的石英发育波状消光, 正交偏光。(g, h) 双河样品HCC-2中的石英含少量次生的气液两相流体包裹体, 单偏光。(i) 菖蒲样品PWL-3a的阴极发光图像, 石英与硬玉发光较弱, 钠长石呈橘红色发光。Ab, 钠长石; Ap, 磷灰石; Coe, 柯石英; FI, 流体包裹体; Grt, 石榴子石; Jd, 硬玉; Q, 石英; Rt, 金红石; Sym, 后成合晶; Mz, 独居石

Figure 3 Field occurrence and microscopic characteristics of ultrahigh-pressure jadeite quartzite from the Dabie Mountains. (a) Field photograph of grayish-green massive jadeite quartzite exposed in the Changpu area. (b) Scanned thin-section image of sample PWL-3a (Changpu), composed mainly of quartz, jadeite, and garnet, plane-polarized light (PPL). (c) Photomicrograph showing coesite inclusion in jadeite, partially replaced by aegirine and symplectite of amphibole+plagioclase, PPL. (d, e) Fine-grained granoblastic quartz with rare inclusions, shown in PPL and cross-polarized light (CPL), respectively. (f) Quartz in sample HCC-1 (Shuanghe) showing undulatory extinction, CPL. (g, h) Quartz in sample HCC-2 (Shuanghe) containing minor secondary two-phase (liquid+vapor) fluid inclusions, PPL. (i) Cathodoluminescence image of sample PWL-3a (Changpu) showing weak luminescence in quartz and jadeite, and orange-red luminescence in albite. Ab, albite; Ap, apatite; Coe: coesite; FI, fluid inclusion; Grt, garnet; Jd, jadeite; Q, quartz; Rt, rutile; Sym, symplectite; Mz, monazite

1.6 ppm)、0.8~4.7 ppm(平均 2.9 ± 1.2 ppm)。Na含量分别为1.4~8.5 ppm(平均 3.5 ± 2.4 ppm)、1.2~5.4 ppm(平均 2.5 ± 1.4 ppm)、1.3~5.1 ppm(平均 2.8 ± 1.3 ppm)。

新建地区样品XT-8/12中石英的杂质元素总含量及Al、Na含量介于双河地区的三个样品之间, 平均含量分别为 12.9 ± 2.5 、 2.8 ± 1.2 和 2.4 ± 0.8 ppm。相较于XT-8/12, 新建地区另一个样品XJ-1-2中的石英含有偏高的

杂质元素总含量(平均 17.8 ± 4.9 ppm)及Al(平均 6.8 ± 1.7 ppm)、Na(平均 4.8 ± 2.4 ppm)含量。

菖蒲地区四个样品中石英的杂质元素总含量(平均 $19.7 \sim 22.4$ ppm)及Al(平均 $6.1 \sim 7.8$ ppm)、Na(平均 $4.0 \sim 7.3$ ppm)含量比较一致, 且在三个地区样品中总体含量最高。值得指出的是, 所有样品中石英的Al和Na含量之间具有明显的正相关性(图4(b))。

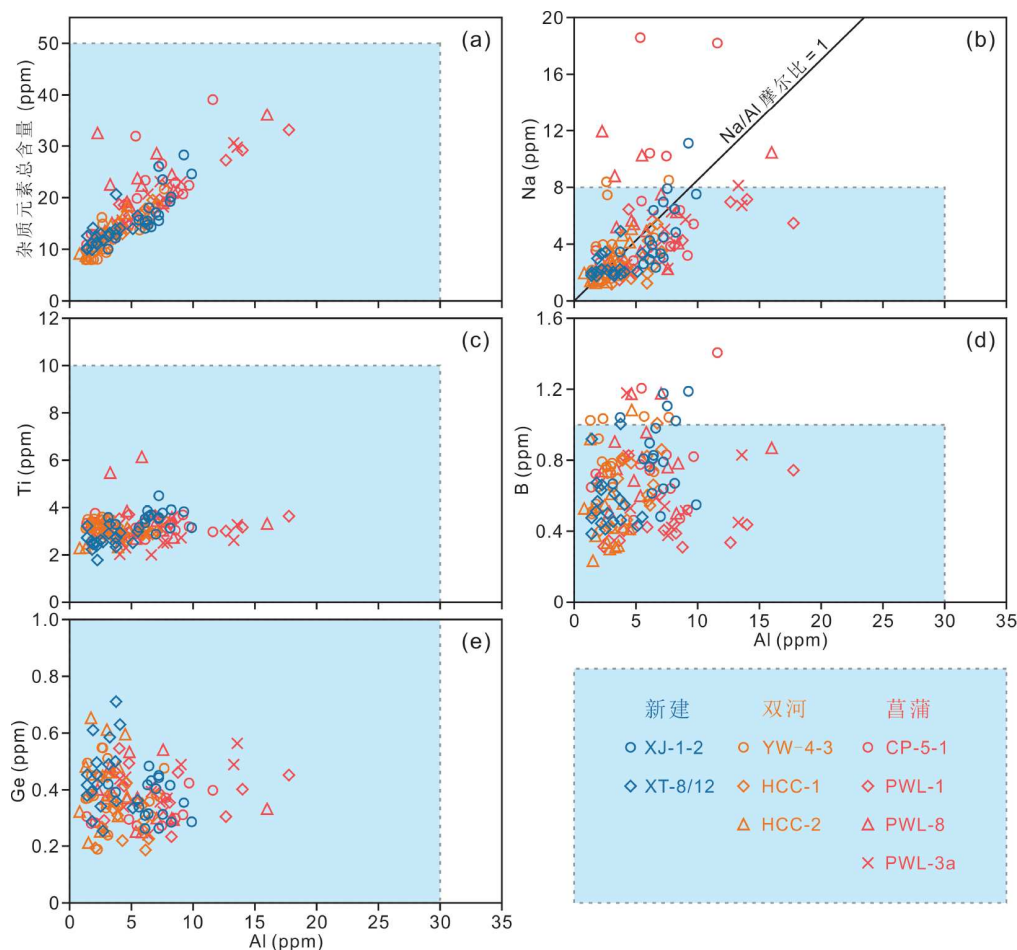


图4 石英中微量元素含量的二元散点图. (a) 总杂质元素与Al; (b) Na与Al; (c) Ti与Al; (d) B与Al; (e) Ge与Al. 浅蓝色阴影区域表示高纯石英的界定范围, 据文献[4]

Figure 4 Binary scatter plot of trace element concentrations in quartz. (a) Total impure elements vs Al; (b) Na vs Al; (c) Ti vs Al; (d) B vs Al; (e) Ge vs Al. The light blue shaded area delineates the compositional field of high-purity quartz, after Ref. [4]

4 讨论

整体而言, 无论是从单点分析还是从整体平均含量的角度评估, 大别山超高压硬玉石英岩中石英的杂质元素总含量以及Al、Na、Ti、B等元素的含量, 绝大部分均符合自然资源部和Müller等人^[4]对高纯石英矿的定义(图4), 仅有极少数单点测得的Na和B含量略超出定义范围(图4(b, d)). 需要说明的是, 高纯石英中Ge的阈值含量尚无明确界定, 但通常几ppm以内的Ge(本研究中<0.7 ppm; 图4(e))对高纯石英的品质影响有限^[4]. 此外, 由于分析背景值过高, 本研究未对K、Ca、Fe和P进行定量测定. 然而, 天然石英中Ca、Fe和P的含量一般较低^[28], 而钾通常赋存于流体包裹体中^[4,28]. 本研究中的石英普遍含流体包裹体较少(图3(d~h))且多

数样品不含钾矿物相, 因此K的影响可进一步忽略.

在二元元素含量变化图解中可以看出, 本研究中Na与Al含量不仅呈现出明显的正相关性, 且二者的摩尔比接近1:1(图4(b)). 在石英晶体结构中, Al主要取代Si进入晶格, 为维持电价平衡, 需要引入一价阳离子(如Li⁺、Na⁺等)^[4,28]. 本研究中Li含量低于检出限(0.05~0.25 ppm), 而Na与Al之间的良好正相关关系表明, 本研究中石英的电价平衡主要由Na⁺的进入来实现.

整体而言, 大别山超高压硬玉石英岩中的高纯石英表现出卓越的品质, 其不仅含有较少的矿物和流体包裹体(图3(d~h)), 而且SiO₂的平均纯度接近或超过99.998%(4N8; 图5(a)). 石英中的Al和Ti杂质在后续提纯过程中难以去除, 二者含量对后期产品高纯石英砂的品质具有重要影响, 是决定高纯石英砂提纯品质的

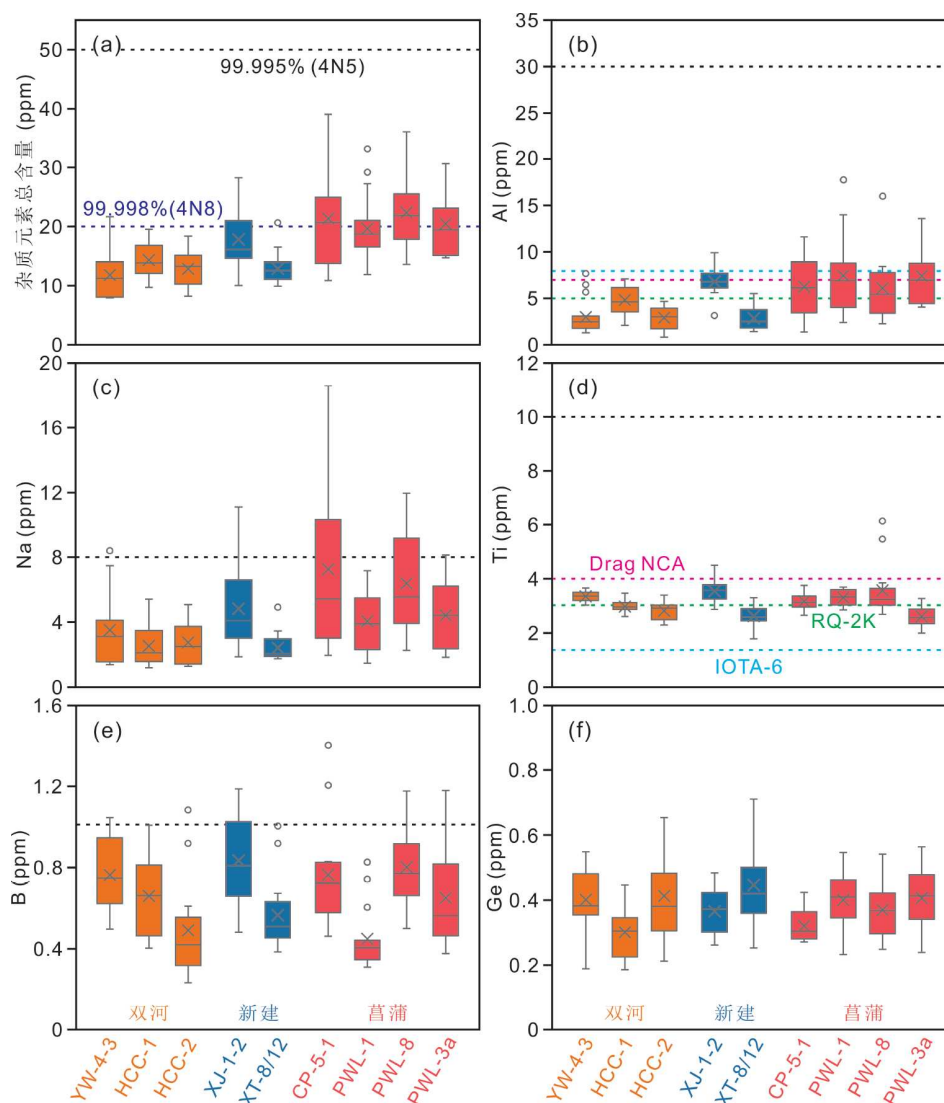


图5 石英中微量元素含量的箱状图。(a) 总杂质元素；(b) Al；(c) Na；(d) Ti；(e) B；(f) Ge。黑色虚线表示高纯石英的含量上限，据文献[4]；青色、粉红色和绿色虚线分别表示高端石英砂产品IOTA-6、Drag NCA和RQ-2K的对应元素含量，详见表S1

Figure 5 Box plots of trace element concentrations in quartz. (a) Total impure elements; (b) Al; (c) Na; (d) Ti; (e) B; (f) Ge. The black dashed line indicates the upper concentration limit for high-purity quartz, after Ref. [4]. The cyan, pink, and green dashed lines represent the corresponding element concentrations of the high-end quartz sand products IOTA-6, Drag NCA, and RQ-2K, respectively (see Table S1 for details)

关键性指标^[1,4]。对比提纯后的国际主流高纯石英砂高端产品，即美国Unimin基于Spruce Pine白岗岩提纯的IOTA系列、挪威The Quartz Corp基于Tysfjord伟晶岩群提纯的Drag系列，以及俄罗斯Russian Quartz基于Kyshtym石英脉提纯的RQ系列，大别山硬玉石英岩中石英的Al和Ti含量均接近或甚至优于这些对标产品(表S1; 图5(b, d))。极低的Li含量(<0.05~0.25 ppm)是大别山硬玉石英岩中高纯石英的另一重要优势，其含量能较好地满足小于1 ppm的实际应用需求^[1]。尽管硬玉石英

岩中石英的Na杂质元素含量相对较高，但该元素在后期提纯中易于去除^[1,4]。因此，大别山硬玉石英岩中的高纯石英经提纯后，其SiO₂纯度有望继续提高，具备服务光伏、光纤和半导体等高端市场需求的潜力。

我们提出，大别山超高压硬玉石英岩中高纯石英的成矿机理与其特殊的形成和演化历史密切相关。寄主岩石中柯石英的存在表明其经历过超高压变质作用(图3(c))，该类岩石中的石英是在折返过程中由柯石英退变形成(图6)。基于不同学者校正的石英Ti含量温度

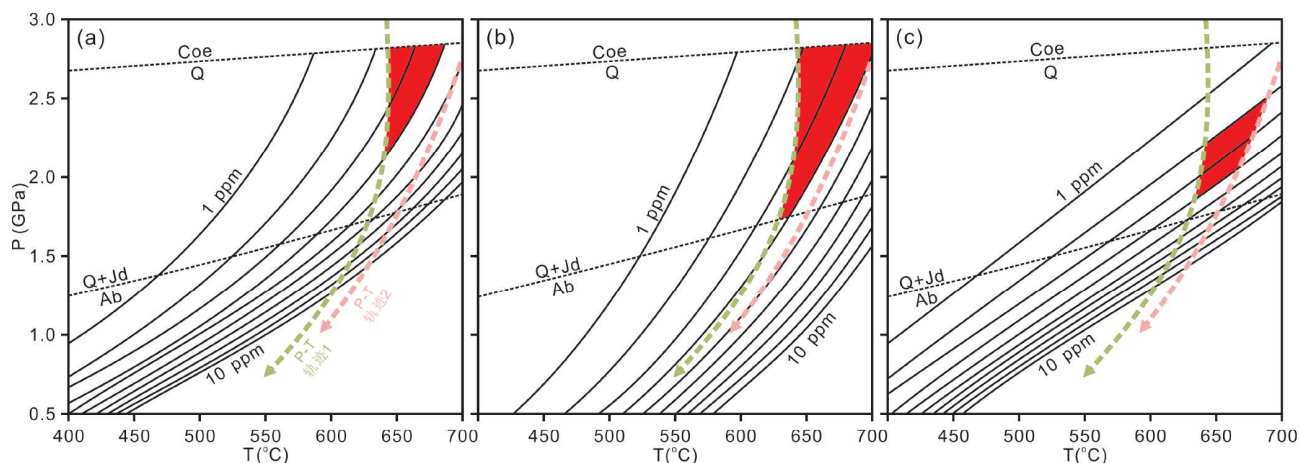


图6 石英中Ti含量等值线(间隔1 ppm)的P-T投影图。(a~c)分别基于Osborne等人^[29]、Huang和Audétat^[30]及Thomas等人^[31]的实验标定结果。浅绿色^[22]和浅粉色^[24]带箭头虚线为前人限定的大别山超高压硬玉石英岩的P-T轨迹。红色阴影区域表示高纯石英形成的温压条件范围

Figure 6 P-T projections showing contours of Ti concentrations in quartz (contour interval: 1 ppm). (a~c) Diagrams are based on the experimental calibrations of Osborne et al.^[29], Huang and Audétat^[30], and Thomas et al.^[31], respectively. The light green (Ref. [22]) and light pink (Ref. [24]) dashed arrows represent previously constrained P-T paths of ultrahigh-pressure jadeite quartzites in the Dabie Mountains. The red shaded area denotes the P-T conditions favorable for the formation of high-purity quartz

计^[29-31]，本研究计算获得了石英中Ti含量等值线在P-T空间中的分布(图6)。结合前人约束的硬玉石英岩的P-T演化轨迹，石英的形成阶段可限定在折返早期的高压榴辉岩相，对应温压条件为630~700℃和1.8~2.8 GPa(图6)。一方面，在柯石英退变为石英的温压条件下，硬玉和石榴子石等其他主要矿物基本保持稳定^[24]，没有含水矿物参与，贫流体条件下石英在成核、结晶和生长的过程中不会与先期存在的硬玉和/或石榴子石颗粒发生显著的成分交换导致石英晶格中高杂质含量，这种单一体系的重结晶和生长也有助于排出原先柯石英晶格中可能存在的杂质元素(也可能是退变石英继承了先存柯石英的低杂质元素含量特征)；另一方面，相对偏低的结晶温度也使得Al、Ti等与温度呈正相关的杂质元素很难进入石英的晶格中。石英中的次生流体包裹体推测主要形成于角闪岩相或更晚阶段，脆性变

形形成的裂隙在外部流体的作用下愈合，形成局部的少量气液两相流体包裹体(图3(g, h))，但这也并未显著改变硬玉石英岩中石英的晶体化学成分。

5 结论

综上所述，大别山超高压硬玉石英岩中石英体积含量较高(30%~60%)、SiO₂的平均纯度接近或超过99.998%、关键杂质元素Al和Ti等含量低、流体包裹体少，是除白岗岩型、伟晶岩型及热液脉型等典型高纯石英原料矿外，未被认识到的一种高品质新型高纯石英原料矿。其高纯品质与硬玉石英岩退变质过程中石英在高压中温、贫流体条件下的结晶和生长密切相关。该原料矿资源量潜力可观，是具有巨大进一步勘探和开发潜力的新型高纯石英矿资源，对保障我国相关领域的战略资源安全具有重要意义。

致谢 感谢中国地质大学(武汉)宗克清、中国科学院地球化学研究所唐燕文、韩俊杰在本研究微量元素分析过程中提供的帮助与技术指导。

参考文献

- 1 Haus R, Prinz S, Priess C. Assessment of high purity quartz resources. In: Götze J, Möckel R, eds. Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. 29-51
- 2 Wang L. Concept of high purity quartz and classification of its raw materials (in Chinese). Conserv Utiliz Miner Resour, 2022, 5: 55-63 [汪灵. 高纯石英的概念及其原料品级划分. 矿产保护与利用, 2022, 5: 55-63]

- 3 Li J, Li Y, Kong H. Current situation and development suggestions of China's high-purity quartz industry chain (in Chinese). *Northwestern Geol*, 2023, 5: 214–222 [李金超, 栗亚芝, 孔会磊. 中国高纯石英产业链及发展建议. *西北地质*, 2023, 5: 214–222]
- 4 Müller A, Wanvik J E, Ihlen P M. Petrological and chemical characterisation of high-purity quartz deposits with examples from Norway. In: Götze J, Möckel R, eds. *Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. 71–118
- 5 Wu F Y, Liu X C, Wang J M, et al. Highly fractionated granite and high-purity quartz (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2025, 41: 3243–3277 [吴福元, 刘小驰, 王佳敏, 等. 高分异花岗岩与高纯石英. *岩石学报*, 2025, 41: 3243–3277]
- 6 Zhou H Y. Geological definition, deposit types and resource assessment of high-purity quartz (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2025, 41: 3289–3301 [周浩阳. 高纯石英的矿床概念、矿床类型与资源评价. *岩石学报*, 2025, 41: 3289–3301]
- 7 Swanson S E, Veal W B. Mineralogy and petrogenesis of pegmatites in the Spruce Pine District, North Carolina, USA. *J Geosci*, 2012, 55: 27–42
- 8 Müller A, Ihlen P M, Snook B, et al. The chemistry of quartz in granitic pegmatites of southern Norway: petrogenetic and economic implications. *Econ Geol*, 2015, 110: 1737–1757
- 9 Zhou H, Müller A, Berndt J. Quartz chemistry fingerprints melt evolution and metamorphic modifications in high-purity quartz deposits. *Geochim Cosmochim Acta*, 2023, 356: 179–195
- 10 Götze J, Pan Y, Müller A, et al. Trace element compositions and defect structures of high-purity quartz from the southern Ural Region, Russia. *Minerals*, 2017, 7: 189
- 11 Li K W, Wang J P, Zhang Z W, et al. Main types, distribution patterns, and prospecting targets of high-purity quartz deposits in East Qinling, China (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2025, 41: 3321–3339 [李开文, 王建平, 张正伟, 等. 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*, 2025, 41: 3321–3339]
- 12 Zhang H, Tan X, Ma Y, et al. Geological characteristics of pegmatite-type high purity quartz in Altay, Xinjiang and preparation technology of 4N8 grade products (in Chinese). *Conserv Utiliz Miner Resour*, 2022, 42: 1–7 [张海敏, 谭秀民, 马亚梦, 等. 新疆阿尔泰伟晶岩型高纯石英矿床地质特征及4N8级产品制备技术. *矿产保护与利用*, 2022, 42: 1–7]
- 13 Müller A, Ihlen P M, Wanvik J E, et al. High-purity quartz mineralisation in kyanite quartzites, Norway. *Miner Depos*, 2007, 42: 523–535
- 14 Huang Y, Sun L, Du Y, et al. A potential 4N8-Grade raw material for high-purity quartz from quartzite ore in the Hengshan region, central-southern China: a geochemical-mineralogical study and purification. *Solid Earth Sci*, 2025, 10: 100276
- 15 Li S, Xiao Y, Liou D, et al. Collision of the North China and Yangtse Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: timing and processes. *Chem Geol*, 1993, 109: 89–111
- 16 Xu J, Zhu G, Tong W, et al. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: a major shear system to the northwest of the Pacific Ocean. *Tectonophysics*, 1987, 134: 273–310
- 17 Zheng Y F, Zhou J B, Wu Y B, et al. Low-grade metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt: a passive-margin accretionary wedge deformed during continent subduction. *Int Geol Rev*, 2005, 47: 851–871
- 18 Zhang R Y, Liou J G, Ernst W G. The Dabie-Sulu continental collision zone: a comprehensive review. *Gondwana Res*, 2009, 16: 1–26
- 19 Zhai M G, Cong B L, Zhao Z Y, et al. High pressure jadeite quartzite in the eclogite facies belt of Dabieshan and its geological significance (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 1992, 37: 1013–1015 [翟明国, 从柏林, 赵中岩, 等. 大别山榴辉岩带的高压硬玉石英岩块体及其地质意义. *科学通报*, 1992, 37: 1013–1015]
- 20 Rolfo F. A coherent lithostratigraphic unit in the coesite-eclogite complex of Dabie Shan, China: geologic and petrologic evidence. *Lithos*, 2004, 73: 71–94
- 21 Guo S, Zhao K, John T, et al. Metasomatic flow of metacarbonate-derived fluids carrying isotopically heavy boron in continental subduction zones: insights from tourmaline-bearing ultra-high pressure eclogites and veins (Dabie terrane, eastern China). *Geochim Cosmochim Acta*, 2019, 253: 159–200
- 22 Liou J G, Zhang R Y, Jahn B. Petrology, geochemistry and isotope data on a ultrahigh-pressure jadeite quartzite from Shuanghe, Dabie Mountains, East-central China. *Lithos*, 1997, 41: 59–78
- 23 Gao X Y, Wang L, Chen Y X, et al. Geochemical evidence from coesite-bearing jadeite quartzites for large-scale flow of metamorphic fluids in a continental subduction channel. *Geochim Cosmochim Acta*, 2019, 265: 354–370
- 24 Massonne H J, Liu P, Li Y, et al. Did jadeite-quartzite bodies experience the same P-T conditions as nearby UHP rock lenses? An example from the Dabie Shan, east-central China. *Neues Jahrbuch für Mineral Abhandlungen*, 2025, 199: 127–142
- 25 Ayers J C, Dunkle S, Gao S, et al. Constraints on timing of peak and retrograde metamorphism in the Dabie Shan Ultrahigh-Pressure Metamorphic Belt, east-central China, using U-Th-Pb dating of zircon and monazite. *Chem Geol*, 2002, 186: 315–331
- 26 Lan T G, Hu R Z, Fan H R, et al. *In-situ* analysis of major and trace elements in fluid inclusion and quartz: LA-ICP-MS method and applications to ore deposits (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2017, 33: 3239–3262 [蓝廷广, 胡瑞忠, 范宏瑞, 等. 流体包裹体及石英LA-ICP-MS分析方法的建立及其在矿床学中的应用. *岩石学报*, 2017, 33: 3239–3262]
- 27 Liu Y, Hu Z, Gao S, et al. *In situ* analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard.

- [Chem Geol](#), 2008, 257: 34–43
- 28 Götze J, Pan Y, Müller A. Mineralogy and mineral chemistry of quartz: a review. [MinMag](#), 2021, 85: 639–664
- 29 Osborne Z R, Thomas J B, Nachlas W O, et al. TitaniQ revisited: expanded and improved Ti-in-quartz solubility model for thermobarometry. [Contrib Miner Petrol](#), 2022, 177: 31
- 30 Huang R, Audétat A. The titanium-in-quartz (TitaniQ) thermobarometer: a critical examination and re-calibration. [Geochim Cosmochim Acta](#), 2012, 84: 75–89
- 31 Thomas J B, Bruce Watson E, Spear F S, et al. TitaniQ under pressure: the effect of pressure and temperature on the solubility of Ti in quartz. [Contrib Miner Petrol](#), 2010, 160: 743–759

补充材料

图S1 大别山超高压硬玉石英岩的显微特征

表S1 主流公司基于不同产地和矿床类型生产的高纯石英砂和大别山超高压硬玉石英岩中的高纯石英微量元素成分

表S2 标准物质NIST SRM 612和SRM 610的分析结果

表S3 监测标样QZ-2的分析结果

表S4 大别山超高压硬玉石英岩中石英的微量元素含量

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “大别山硬玉石英岩: 一种高品质的新型高纯石英原料矿”

Jadeite quartzite in the Dabie ultra-high-pressure metamorphic belt: a novel high-grade high-purity quartz resource

Junfeng Zhang^{*}, Penglei Liu^{*}, Hongkun Zeng, Zhengqiang Liang, Wenlong Liu & Zhenmin Jin

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth and Planetary Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

^{*} Corresponding authors, E-mail: jfzhang@cug.edu.cn; liupenglei@cug.edu.cn

High-purity quartz (HPQ) is a critical raw material for strategic emerging industries such as semiconductors and photovoltaics, and its resource security is vital to national economic development and technological independence. Despite China's production capacity for HPQ sand, high-quality raw ore remains heavily reliant on imports. Except for alaskite, granitic pegmatite, and hydrothermal quartz veins, quartzite has potential as an HPQ raw material but is poorly explored and understood globally. This study focuses on jadeite quartzite from the Dabie ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belt, a new candidate for high-grade HPQ ore, and systematically characterizes its quartz geochemical features and formation mechanism. We collected over 20 jadeite quartzite samples from Shuanghe, Xinjian and Changpu in the Dabie Mountains. The samples were prepared into thin sections and observed via optical microscopy and cathodoluminescence (CL) techniques. *In-situ* trace element analysis of quartz was conducted using femtosecond laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS), targeting 13 impurity elements (Al, Ti, Li, etc.). NIST SRM 610/612 and quartz standard QZ-2 were used for calibration and quality control, with conservative evaluation applied for elements below the detection limit. The results show that jadeite quartzite is dominated by quartz (30–60 vol%) and jadeite, with rare mineral and fluid inclusions in quartz grains. The total impurity content of quartz ranges from 11.8 to 22.4 ppm, with average Al and Ti (key hard-to-remove impurities) contents of 2.8–7.5 ppm and 2.6–3.6 ppm, respectively. The SiO₂ purity approaches or exceeds 99.998% (4N8), and these geochemical indices are comparable to or even better than international high-end HPQ sand products (e.g., IOTA-6, Drag NCA). Na and Al show a 1:1 molar positive correlation, with Na⁺ balancing the charge caused by Al³⁺ substituting Si⁴⁺ in the quartz lattice. The high purity of quartz is attributed to its crystallization from coesite retrograde metamorphism under high-pressure and medium-temperature conditions (1.8–2.8 GPa, 630–700°C) in fluid-poor environments, which inhibits impurity incorporation into the quartz lattice. This study identifies the Dabie jadeite quartzite as a new type of high-quality HPQ resource, revealing a novel genetic mechanism for HPQ formation related to UHP metamorphism. It provides a new prospecting direction for China's HPQ resources and expands the types of exploitable HPQ deposits, which is of great strategic significance for reducing import dependence, safeguarding national HPQ resource security, and supporting the sustainable development of related high-tech industries. The considerable resource potential of this jadeite quartzite also makes it a promising strategic resource for China's HPQ sand production.

high-purity quartz, jadeite quartzite, trace element, high-pressure medium-temperature retrogression

doi: [10.1360/CSB-2026-0037](https://doi.org/10.1360/CSB-2026-0037)