

南秦岭武当地区小花果 4N8 级脉石英型高纯石英矿床的发现及其地质意义

张维峰^{1,2*}, 吕登³, 邹俊铠⁴, 伍姝珊³

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北武汉, 430205
2. 中南地质科技创新中心, 湖北武汉, 430205
3. 湖北省地质局第七地质大队, 湖北宜昌, 443100
4. 中国地质大学(武汉), 资源学院, 湖北武汉, 430074

The discovery and geological significance of the Xiaohuaguo 4N8-grade hydrothermal vein-type High-purity quartz deposit in Wudang uplift, South Qinling, Central China

Weifeng Zhang^{1,2*}, Deng Lv³, Junkai Zou⁴, Shushan, Wu³

1. Wuhan Center of Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China
2. Research Center for Petrogenesis and Mineralization of Granitoids, Wuhan 430205, Hubei, China
3. No. 7th Geological Team of Hubei Geological Bureau, Yichang 443100, Hubei, China
4. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan, 430074, China

摘要: 高纯石英是半导体、光纤通讯、新能源和航空航天等高新技术领域必不可少的关键材料, 其源岩主要来源于花岗伟晶岩、白岗岩和热液脉型石英等。脉石英作为高纯石英矿床重要的成因类型之一, 在我国相关研究却较为罕见。本文以南秦岭武当隆起的小花果矿床为例, 对其开展高纯石英可制备性研究。显微岩相学分析表明, 小花果石英晶体粒径均一, 大部分颗粒内部纯净, 含少量线状包裹体群, 面状包裹体群极少; 脉石矿物白云母主要分布于石英

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(批准号: 2023AFD207; 2025AFB962)和中国地质调查局项目(批准号: DD20250208809)的共同资助

*第一作者简介: 张维峰(1985-), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事岩石、矿物、矿床学研究。Email: didazhweifeng@163.com; ORCID: 0000-0003-3822-8046

矿物颗粒之间，其他矿物赤铁矿、钾长石和锆石等含量极少。此外，小花果石英具有较低含量的 Al (6.26~10.15 $\mu\text{g/g}$)、Ti (0.17~3.45 $\mu\text{g/g}$) 和 Li (0.16~0.85 $\mu\text{g/g}$) 等晶格杂质元素。经工艺矿物学提纯后，小花果石英砂的杂质元素总量仅为 11.98 $\mu\text{g/g}$ ，残留的面状包裹体群极少，符合 4N8 级高纯石英标准。该高纯石英矿床的发现为我国寻找脉石英型高纯石英提供了新的远景区。

关键词：高纯石英；脉石英；小花果矿床；武当隆起；南秦岭

Abstract: High-purity quartz (HPQ) is a critical material for high-tech fields such as semiconductors, optical fiber communications, new energy, and aerospace. Its primary sourced from granitic pegmatite, alaskite, and hydrothermal vein-type quartz. However, hydrothermal vein-type quartz HPQ deposits, as an important genetic subtype, are rarely reported in China. In this contribution, we investigate the potential for HPQ preparation and the metallogenic geochronology of the Xiaohuaguo deposit located in the Wudang uplift of the South Qinling. Microscopic petrographic analysis indicates that the quartz crystals in the Xiaohuaguo deposit are uniform in grain size. Most quartz grains are pure and contain small amounts of linear inclusion clusters, while planar inclusion clusters are extremely rare. The principal gangue mineral muscovite predominantly occurs between quartz grains, while other associated minerals such as hematite, K-feldspar, and zircon are present only in minor quantities. In addition, the Xiaohuaguo quartz contains low concentrations of lattice impurities, with Al, Ti, and, Li contents ranging from 6.26 to 10.15 $\mu\text{g/g}$, 0.17 to 3.45 $\mu\text{g/g}$, and 0.16 to 0.85 $\mu\text{g/g}$, respectively. After purification, the total impurity content of the Xiaohuaguo quartz sand is only 11.98 $\mu\text{g/g}$, with minimal residual planar inclusion clusters, making it suitable for producing 4N8-grade HPQ. This discovery of Xiaohuaguo HPQ deposit provides a new prospective area for the exploration of hydrothermal vein-type high-purity quartz resources in China.

Keywords: High-purity quartz; hydrothermal vein-type quartz; Xiaohuaguo deposit; Wudang uplift; South Qinling

0 引言

高纯石英是指由天然石英原料经过物理化学技术加工提纯后 SiO_2 纯度极高的石英产品, 其不仅要求杂质总量小于 $50 \mu\text{g/g}$, 而且对 Al、Ti 和 Li 等 15 种关键元素的含量上限、包裹体含量和石英的粒度分布等均有明确的限定 (Müller et al., 2012; Zhou et al., 2023; 吴福元等, 2025)。由于具有耐腐蚀、耐高温、高度绝缘性、低热膨胀性和透光性等优越的物理化学性质, 高纯石英是半导体、光纤通讯、新能源和航空航天等高新技术领域不可或缺的材料 (Haus et al., 2012; 王九一, 2021; Xia et al., 2023; Zhang et al., 2023)。随着我国战略性新兴产业的高速发展, 高纯石英的市场需求量也越来越大 (张海啟等, 2022a; 赵维佳, 2023)。然而, 目前我国的高纯石英主要依赖于进口 (汪灵, 2019; 王云月等, 2021)。对外依存度过高, 加之国外的出口限制和技术封锁, 我国高纯石英的安全供应已面临巨大挑战 (田冲等, 2022; Wang et al., 2022; 罗小南等, 2023)。因此, 寻找高纯石英资源的战略储备基地、合理开发利用资源已迫在眉睫。

作为一种战略性非金属矿产, 高纯石英主要由白岗岩、花岗伟晶岩和热液脉型石英加工提纯而来, 少数来源于天然水晶 (Müller et al., 2012; Glover et al., 2012; Götze et al., 2017; Zhang et al., 2023; Zhou et al., 2023)。例如, 美国北卡罗来纳州的 Spruce Pine 白岗岩和花岗伟晶岩、挪威北部 Tysfjord 地区的花岗伟晶岩以及俄罗斯乌拉尔地区和挪威北部的 Nesodden、Kvalvik、Svanvik 等脉石英已被证实可用以生产制备高纯石英 (Müller et al., 2012; Götze et al., 2017; 王九一, 2021; Zhou et al., 2023; 周浩阳, 2025)。近年来, 随着我国地勘资金的持续投入, 在新疆阿尔泰和河南东秦岭地区相继发现了花岗伟晶岩型和白岗岩型高纯石英矿床 (张海啟等, 2022b; 郭峰等, 2024; 王建平等, 2025; 吴福元等, 2025; Zhang et al., 2025)。然而, 作为高纯石英主要成因类型之一的脉石英则鲜有关注。根据前人的梳理总结, 我国脉石英矿床分布十分广泛, 如: 伊犁微陆块、中祁连成矿带、小兴安岭造山带、大别造山带及南秦岭等地区均有大量的脉石英矿床出露 (高树学等, 2020)。除了资源较为丰富以外, 脉石英还兼具 SiO_2 含量高、矿石品质稳定和回收率高等优点 (汪灵等, 2020)。我国是否也具有脉石英型高纯石英矿的成矿潜力仍不得而知。

作为中央造山带的重要组成部分, 南秦岭武当隆起先后经历了新元古代后碰撞伸展、奥陶纪洋盆开启和三叠纪洋盆闭合与陆-陆碰撞等多阶段的构造演化, 岩浆活动强烈、断裂-褶

皱构造发育 (Yue et al., 2014; Nie et al., 2016; Wang et al., 2016)。由于强烈的构造和岩浆活动, 南秦岭武当隆起广泛发育着热液脉型石英矿, 如蒿坪、小花果、门前沟、皮鼓、青山、麻花铺、木瓜园、漂草池和洄水等。为了分析该区脉石英矿床的原料特征, 探讨脉石英型高纯石英的成矿潜力, 我们选取了小花果矿床为研究对象, 系统的开展了石英微区化学成分分析、流体包裹体和共伴生矿物显微岩相学观察以及提纯实验, 并通过与尤尼明公司 IOTA CG 高纯石英砂的对比综合评估了其矿石品质。小花果脉石英型高纯石英矿床的发现不仅填补了我国脉石英型高纯石英的研究空白, 而且为我国高纯石英资源勘查提供了新的找矿有利区。

1 地质背景

1.1 区域地质背景

秦岭造山带是一条复杂的大陆碰撞造山带, 由多种前寒武纪结晶基底、古生代至中三叠世构造岩层地层单元, 以及中生代至新生代盆地沉积物和花岗岩组成 (Dong and Santosh, 2016)。根据出露地层特征和构造接触关系等证据, 该造山带及邻区从北往南可依次划分为华北陆块南缘、北秦岭、南秦岭和扬子陆块北缘 (图 1a), 是华北板块向扬子板块俯冲碰撞的产物 (Dong and Santosh, 2016)。作为秦岭造山带的重要组成部分, 南秦岭构造单元位于商-丹断裂和青峰-襄樊-广济断裂之间 (Zhang et al., 2019; 图 1b)。在此构造格架下, 武当隆起是南秦岭前寒武纪基底揭露最为广泛的区域, 其核部为成冰纪武当群地层, 四周被埃迪卡拉纪至显生宙沉积火山岩覆盖 (Ling et al., 2008; 图 1b)。

构造样式和变质年代学研究表明, 南秦岭武当隆起自古生代以来主要经历了志留纪至二叠纪的 NS 向伸展滑脱构造、早三叠世的逆冲推覆构造和随后的走滑运动, 形成了一系列 NW 和近 EW 向断裂 (曾云, 1998; 胡健民等, 2002; 秦正永等, 2005; 图 1b)。武当隆起的岩浆活动主要集中于新元古代, 岩性从基性到酸性均有发育, 如桃源辉长岩、泰山庙闪长岩、蒿坪粗面岩、五里坪和牌楼 A₁ 型花岗岩等 (Ling et al., 2008; Wang et al., 2016; 张维峰等, 2018)。岩石地球化学特征表明, 区内广泛分布的新元古代岩浆岩主要源于岩石圈地幔的部分熔融, 形成于俯冲板片断裂的后碰撞伸展环境下 (Wang et al., 2016; 张维峰等, 2018)。此外, 区内还发育有少量的奥陶纪和三叠纪辉绿岩脉, 分别与南秦岭洋的开启和闭合有关 (Nie et al., 2016)。受强烈构造活动的影响, 武当隆起已发现有银洞沟、许家坡、铺子门、余家院和六斗等造山型金矿和金-银多金属矿床, 以及蒿坪、小花果、门前沟、皮谷、青山、木瓜园和洄水等脉石英矿床。

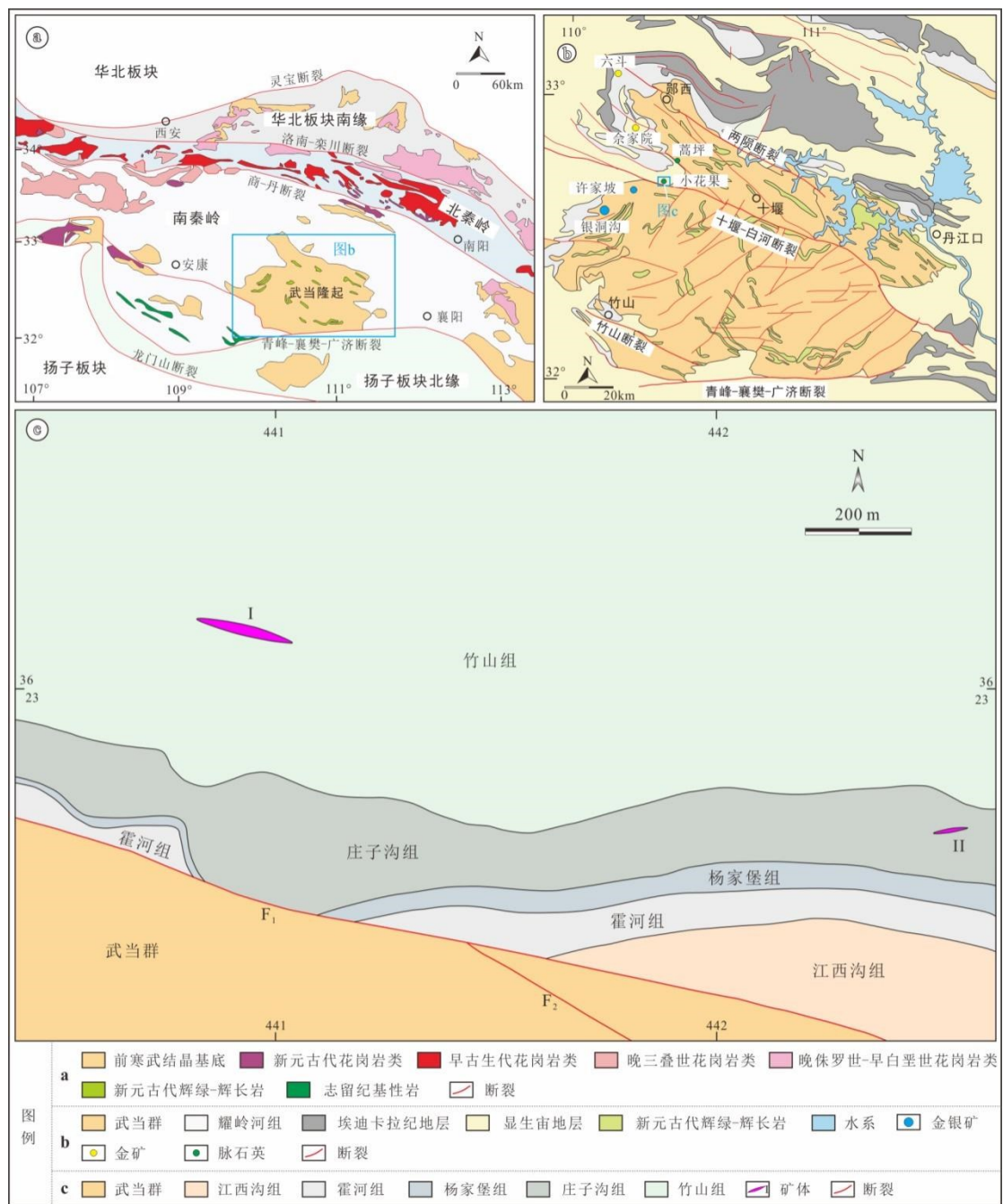


图 1 (a) 秦岭造山带构造简图 (据 Zhang et al., 2019 修编); (b) 武当隆起大地构造位置图 (据 Ling et al., 2008 修编); (c) 小花果矿区地质图

Fig. 1 (a) Geological sketch of the Qinling Orogenic Belt (modified after Zhang et al., 2019). (b) Geologic map of Wudang Uplift (modified after Ling et al., 2008); (c) Geologic map of the Xiaohuaguo hydrothermal vein-type quartz deposit.

1.2 矿区地质特征

小花果脉石英出露于武当隆起的西段，距离十堰市鲍峡镇 NE 方向约 5 km。矿区内出

露的地层从老到新依次为成冰纪武当群双台组、埃迪卡拉纪江西沟组、埃迪卡拉-寒武纪霍河组、寒武纪杨家堡组和庄子沟组以及寒武-奥陶纪竹山组（图 1c）。其中，双台组主要为变中-酸性火山岩碎屑岩为主，局部夹少量变沉积岩；江西沟组的岩性则是以富黄铁矿的含炭砂质板岩为特征；霍河组主要为一套碳酸盐岩建造，局部夹含碳泥质板岩和碳质板岩；杨家堡组主要为灰黑色中-厚层状硅质岩；庄子沟组主要为黑色含碳质硅质板岩；竹山组主要为深灰色绢云石英千枚岩和片岩等。矿区内的构造主要为一组北西-南东走向的断裂，无侵入岩出露（图 1c）。

通过大比例尺专项地质测量和探槽工作，笔者及其调查团队在小花果矿区内共圈定出 2 条矿体。其中，I 号矿体呈现出中间宽、两头窄的透镜体状（图 2a），赋存于寒武-奥陶系竹山组绢云石英千枚岩中，沿走向出露 176 m，真厚度 0.89~22.63 m，倾向约 8~17°，倾角 45~61°。该矿体与围岩之间接触界面截然，未见明显蚀变现象（图 2b），局部可见有少量的围岩残留于石英脉体中。II 号矿体呈脉状产出，赋存于寒武系庄子沟组含炭砂质板岩中，沿走向出露 40 m，真厚度 1.0~1.2 m，倾向约 340~350°，倾角约 50~60°，矿体与围岩之间的接触界面平直连续，亦未见明显蚀变现象（图 2c）。虽然本次调查未布设深部钻探工程，但按照最新发布的《矿产地质勘查规范 高纯石英矿》征求意见稿，大型、中型和小型高纯石英矿床对矿体沿走向出露规模的要求分别为>500 m、200~500 m 及<200 m(万会等, 2026)，而对延伸方向并未做出明确的规定。小花果脉石英的 I 号矿体地表出露 176 m，已接近中型高纯石英矿床规模远景。小花果矿石主要为致密块状构造，肉眼观察局部表面有淡黄褐色铁锈，推测为含铁矿物氧化所致；石英矿物具有典型糖粒状结构，其晶粒呈乳白色至灰白色调，透光性表现为透明-半透明过渡特征，并普遍发育油脂光泽（图 2c, d）。

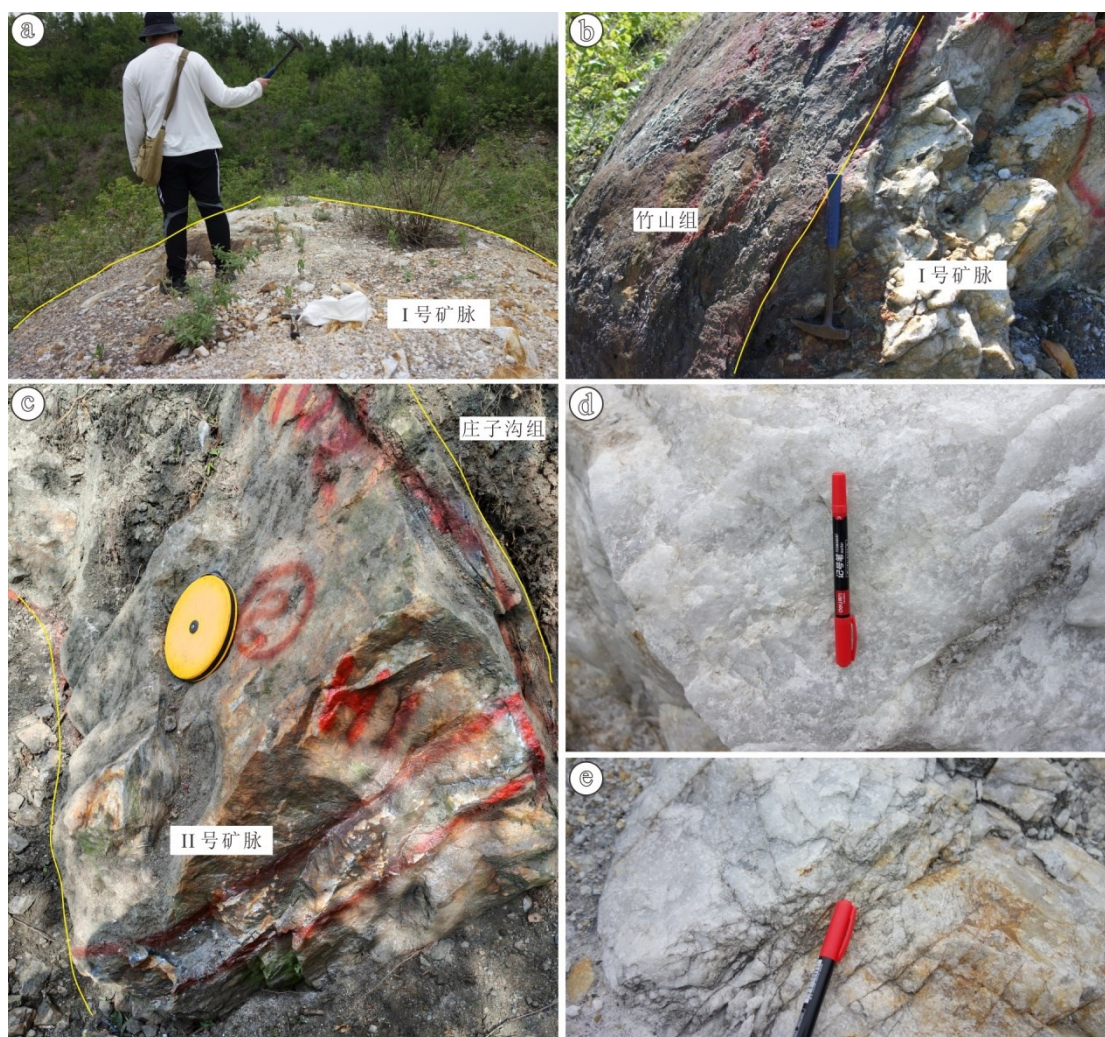


图2 小花果脉石英野外及矿石结构特征。(a) 小花果 I 号矿脉呈透镜体状；(b) 小花果 I 号矿体与围岩竹山组的接触界面无明显蚀变发育；(c) 小花果 II 号矿体呈脉状灌入庄子沟组中；(d) 小花果石英呈粒状结构、块状构造；(e) 小花果石英中发育少量铁锈

Fig.2 Representative photographs showing the field relations and textural features of the Xiaohuaguo hydrothermal vein-type quartz deposit. (a) The Xiaohuaguo No. I orebody occurs as a lenticular body. (b) There is no significant alteration development along the boundary between the Xiao Huaguo No. I Orebody and the Zhushan Formation. (c) The Xiao Huaguo No. II Orebody occurs as veins cut through the Zhuangzigou Formation. (d) The Xiaohuaguo quartz ore displays granular texture and exhibits a massive structure. (e) Minor yellow-brown iron oxide mineralization is observed within the massive ore.

2 岩相学

2.1 石英产出特征

岩相学观察结果显示，小花果石英矿石中的主要矿物为石英，体积占比超过 98%。石

英晶体以颗粒状为主，晶型完整，晶体粒径较为均一，分布于 0.1~3 mm 之间（图 3a, b）。石英晶体内部裂隙不发育，矿物间边界清晰连续，大部分矿物颗粒之间呈 120° 的三连点结构（图 3a-c），指示静态重结晶特征（Passchier and Trouw, 2005）。在少数石英颗粒中可见膨凸和波状消光现象（图 3a-b），指示一定程度的动态重结晶作用（Mancktelow and Pennacchioni, 2004）。阴极发光结果显示，石英呈均匀的灰黑色、无生长环带发育（图 3e-h）。

2.2 共伴生矿物组合

基于光学显微镜和阴极发光分析，小花果石英矿石中的脉石矿物含量从高到低依次包括白云母、铁氧化物、钾长石和锆石等。白云母作为最主要的杂质矿物，常呈半自形针状或自形片状结构分布于石英矿物颗粒间隙，少数嵌布于石英晶体内部，粒径介于 0.2~0.5 mm（图 3a, b, c, e, f）。赤铁矿、钾长石和锆石含量极少，粒径均小于 0.05 mm，主要以包裹体形式赋存于石英晶体内部（图 3d, g, h）。

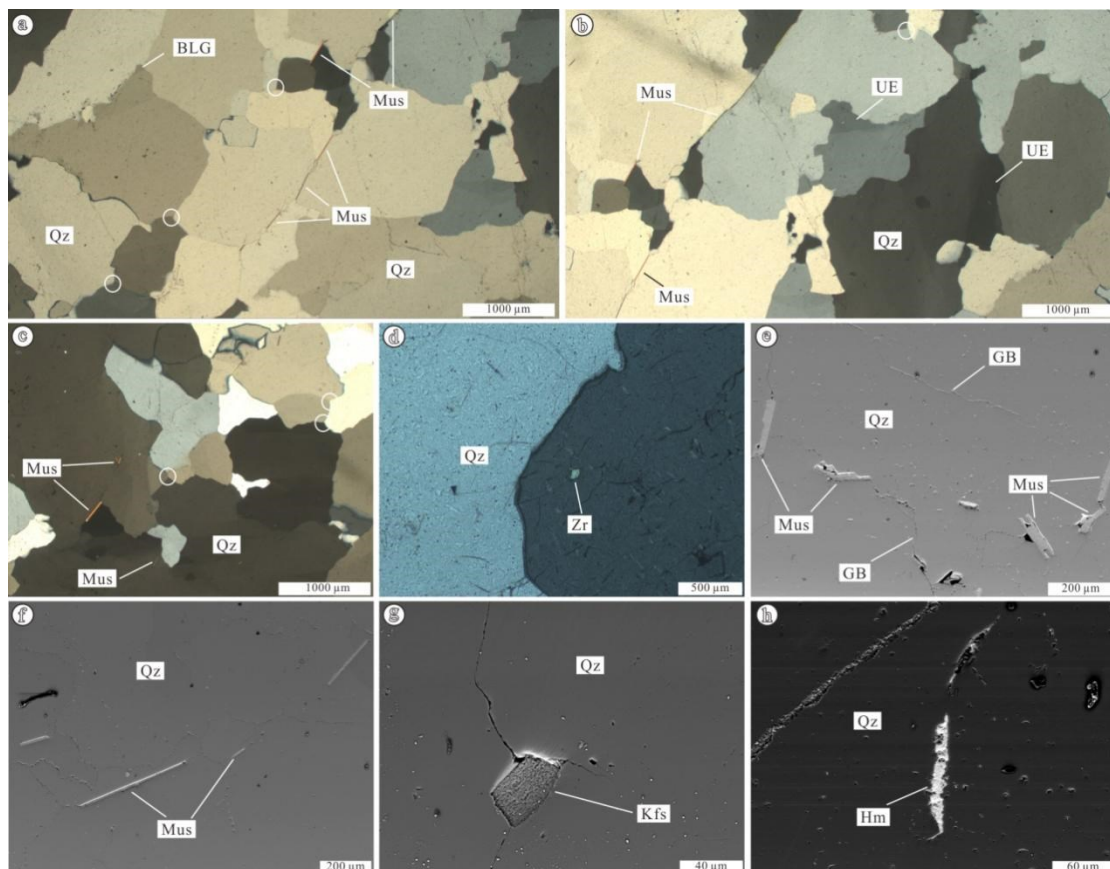


图 3 小花果石英及主要脉石矿物分布特征。（a）石英呈颗粒状，发育三连点结构和膨凸现象，可见沿石英矿物颗粒边界分布的针状白云母；（b）部分石英颗粒发育波状消光，沿石英矿物颗粒边界分布的针状白云母；（c）少量白云母嵌布于石英晶体内部；（d）细小的锆石以包裹体形式赋存于石英晶体内部；（e）石英 CL 结构均一、无生长环带，沿石英颗粒边部发育有自形片状白云母；（f）CL 观察到的针状白云母；（g）

半自形钾长石；（h）石英晶体内部发育的赤铁矿

缩写：BLG = 膨凸，UE = 波状消光，GB = 矿物颗粒边界，Qz = 石英，Mus = 白云母，Zr = 锆石，Kfs = 钾长石，Hm = 赤铁矿

Fig. 3 Distribution characteristics of Xiaohuaguo quartz and its associated minerals. (a) Quartz exhibits granular texture with developed triple junction structures and bulging recrystallization, with acicular muscovite is distributed along quartz grain boundaries; (b) Partial quartz grains display undulatory extinction and acicular muscovite is distributed along quartz grain boundaries; (c) Minor muscovite is embedded within quartz crystals; (d) Fine-grained zircon occurs as inclusions within quartz crystals; (e) Quartz demonstrates a homogeneous CL structure without growth zoning, with euhedral platy muscovite is distributed interstitially between quartz grains; (f) Acicular muscovite was observed under CL; (g) Subhedral K-feldspar crystal is present; (h) Hematite developed within quartz crystals.

Abbreviations: BLG = Bulging recrystallization; UE = Undulatory extinction; GB = Grain boundary; Qz = quartz; Mus = Muscovite; Zr = Zircon; Kfs = K-feldspar; Hm = Hematite.

2.3 流体包裹体特征

总体上，小花果石英晶体中的流体包裹体相对稀少。在低倍镜视域中，多数石英晶体高度纯净且几乎不含包裹体，表现出极高的透明度（图 4a, b）；少数石英晶体中可见条带状流体包裹体群，赋存于石英晶体内部或矿物颗粒边界附近（图 4a, b, c）。此外，在高倍镜视域中可见少量面状包裹体群分布于少数石英晶体内部（图 4d）。这些包裹体呈不规则状、椭圆形、负晶形、三角形及多边形等多种形状，大小介于 4~12 μm 之间，个别包裹体粒径可达 18 μm （图 4）。根据室温下的相态特征，可识别出三类流体包裹体，包括：富液两相包裹体、富气两相包裹体及纯气相包裹体（图 4d）。

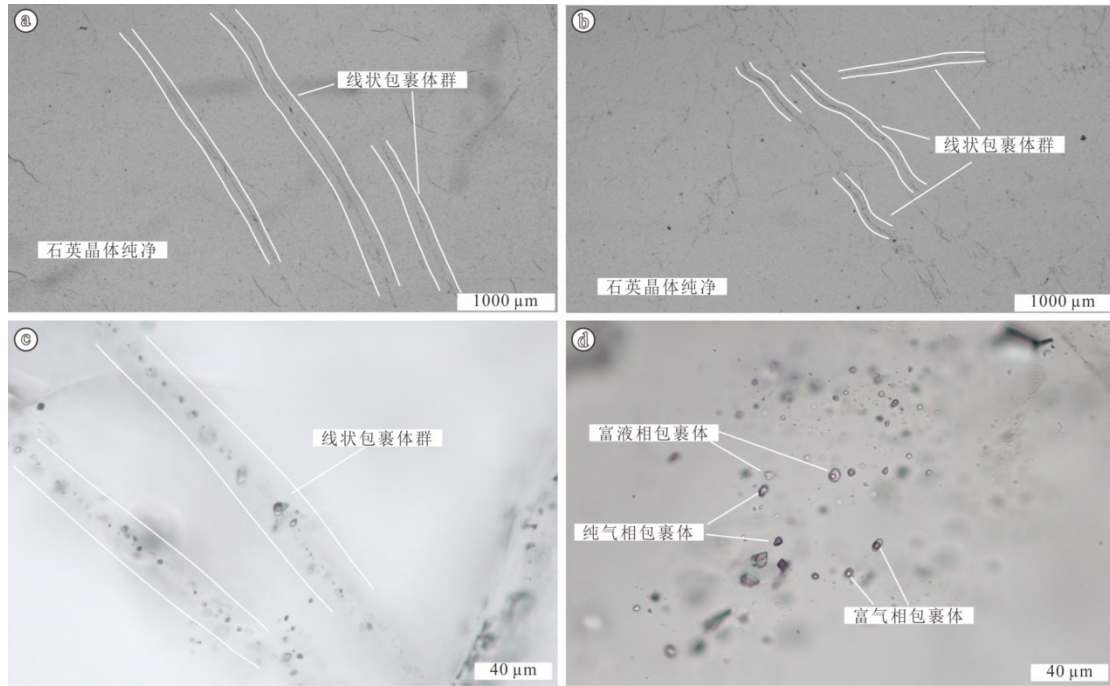


图 4 小花果石英流体包裹体分布特征。(a) 大部分石英晶体内部干净，几乎不含包裹体；少数石英晶体内部发育条带状包裹体群；(b) 大部分石英晶体内部干净，少数石英颗粒边界发育线状包裹体群照片；(c) 石英晶体内部发育的条带状包裹体群；(d) 少数石英晶体内部的面状包裹体群，根据室温下的形态可以细分为富液两相包裹体、富气两相包裹体及纯气相包裹体

Fig.4 Photomicrographs of fluid inclusions distribution in the Xiaohuaguo quartz deposit. (a) Most quartz grains are highly pure and virtually inclusion-free, whereas a small number of quartz crystals contain distinct banded clusters of fluid inclusions. (b) Most quartz crystals are internally clean, while a few quartz grains exhibit linear inclusion clusters at their boundaries. (c) Banded inclusion clusters developed within the quartz crystal. (d) Scattered planar clusters of fluid inclusions occur within rare quartz crystals and can be subdivided into three types, including liquid-rich two-phase, vapor-rich two-phase, and pure vapor-phase fluid inclusions.

拉曼光谱分析结果显示，小花果石英中大多数气液两相流体包裹体中存在两个显著的 CO_2 异常峰，其拉曼位移分别为 1283 cm^{-1} 和 1387 cm^{-1} (图 5a)，表明 CO_2 主要以气相形式存在 (Frezzotti et al., 2012)。这类包裹体中还可以检测到微弱的液态 H_2O 异常峰 (图 5a)，属于典型的 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 两相包裹体。此外，小花果少部分的气液两相包裹体仅检测到 H_2O 成分 (图 5b)，属于纯水双相包裹体。

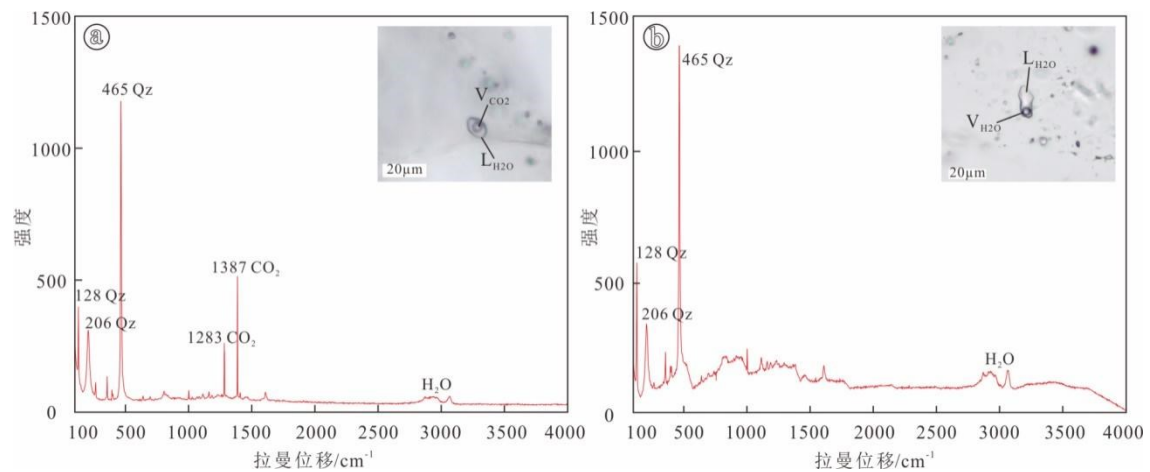


图5 小花果石英流体包裹体拉曼光谱特征。(a) 两相流体包裹体中液相 H₂O 和气相 CO₂ 光谱；(b) 两相流体包裹体中液相 H₂O 光谱。

Fig. 5 Laser Raman spectroscopy of the fluid inclusions from the Xiaohuaguo deposit. (a) Spectrum of liquid phase H₂O and vapor phase CO₂ in a two-phase fluid inclusion. (b) Spectrum of liquid phase H₂O in a two-phase fluid inclusion.

3 分析及测试结果

3.1 石英 LA-ICP-MS 微区成分分析

为了确保分析数据的代表性,用于原位成分分析的4件石英样品分别采自小花果矿床I号矿体的两端和中部,以及II号矿体的中部。测试中以厚度约120 μm的激光片为载体,每件样品分析15个点位。石英的原位微量元素分析在东华理工大学由LA-ICP-MS测试完成,采用257 Femtosecond激光和PE NexION 1000型ICP-MS的联机系统。实验中采用氦气作为载气、氩气作为补偿气以调节灵敏度,使用NIST SRM 610、NIST SRM 612和NIST SRM 614作为外标进行多外标无内标校正。激光束斑直径采用30 μm,最大激光能量为5.0 J/cm²,频率为5 Hz。每个分析数据包括约28 s背景采集时间和45 s的样品信号。检测元素包括⁷Li、⁹Be、¹⁰B、²³Na、²⁴Mg、²⁷Al、³⁹K、⁴⁷Ti、⁵⁵Mn、⁵⁷Fe、⁶⁹Ga和⁷⁴Ge,分析精度优于0.1×10⁻⁶。由于受限于测试技术难点(Müller et al., 2008),本次分析未检测Ca和P元素含量。实验数据采用ICP-MS DataCal 7.2软件来进行校正处理(Liu et al., 2008)。

LA-ICP-MS测试结果显示,小花果石英颗粒均显示出较低的微量元素特征,总量介于12.47~41.68×10⁻⁶之间(表1)。其中,Al是小花果石英最主要的杂质元素,含量变化不大,介于6.26~10.15×10⁻⁶(图6)。除了6个测点Ti含量低于检出限以外,其余54颗石英的Ti含量分布于0.17~3.45×10⁻⁶。所测60颗石英的Li、Na、Mg和Mn含量均高于检出限,分别

变化于 $0.16\sim0.85\times10^{-6}$ 、 $0.40\sim8.31\times10^{-6}$ 、 $0.01\sim0.79\times10^{-6}$ 和 $0.62\sim2.46\times10^{-6}$ 之间。此外，绝大多数石英的 Be、B、K 和 Fe 含量低于或接近检出限。除少数测点以外，其余石英颗粒均检测出极少量的 Ge 和 Ga 含量，平均值分别为 0.13×10^{-6} 和 1.52×10^{-6} 。

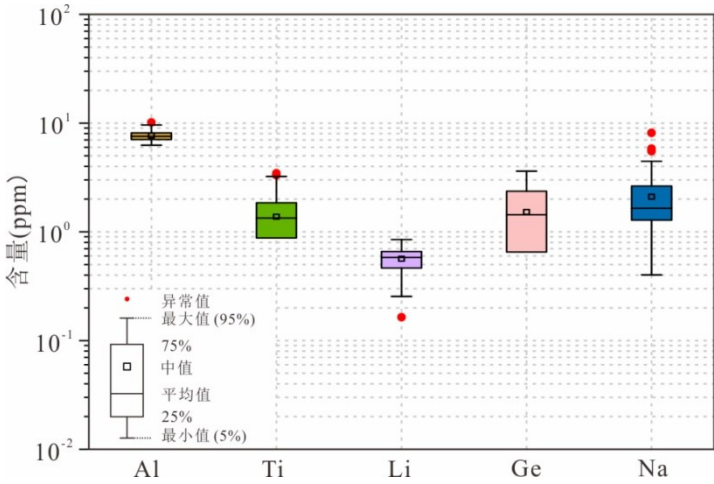


图 6 小花果石英微量元素箱线图

Fig.6 Box and whisker plots for trace elements of quartz grains from the Xiaohuaguo deposit

3.2 石英提纯实验与 ICP-OES 元素分析

用于工艺矿物学提纯实验及随后成分分析的石英样品来源于小花果 I 号矿脉。提纯实验在中国科学技术大学完成，步骤依次为煅烧、水淬、破碎、筛分、重选、磁选、浮选、酸浸、煅烧、水淬、酸浸和高温氯化。实验中将 1 kg 石英原料矿石清洗烘干后置于 KSY 12 16A 型马弗炉，加热至 850°C 并煅烧 1 小时，煅烧后的石英矿石迅速倒入超纯水中骤冷。使用颚式破碎机将煅烧后的石英矿石破碎成砂，并使用标准尼龙筛筛分获得粒径为 $0.250\sim0.106\text{ mm}$ 的石英砂。石英砂依次经过重选、磁选去除可能存在的重矿物和磁性矿物。浮选采用高效、简便的氢氟酸浮选法，以氢氟酸为活化剂、十二烷基胺为阳离子捕收剂，得到浮选石英砂。浮选石英砂随后置于 HF-HCl-HNO₃ 混合酸溶液中，在 80°C 条件下酸洗 24 小时，洗涤干燥后得到一次酸洗石英砂。对一次酸洗石英砂进行高温煅烧后再进行二次煅烧、水淬、酸浸，洗涤干燥后得到二次酸洗石英砂。完成上述流程后，通过高温氯化去除碱金属杂质，最终得到氯化石英精砂。详细的技术方法见 [Xia et al. \(2023\)](#)。提纯后的石英砂在同一实验室采用电感耦合等离子体发射光谱 (ICP-OES) 进行微量元素测定，检测元素包括 Al、Ti、Na、K、Li、Ca、Fe、P、B、Co、Cr、Cu、Mg、Mn、Ni、Zn 和 Zr 等 17 种。实验中使用中国石英岩 GBW07837 作为内标进行数据质量监控，分析精度优于 $\pm 10\%$ 。全流程空白所测元素含量均低于测试样品，暗示所测结果可以真实的反映小花果提纯后石英砂的成分特征。

经提纯后，小花果石英砂 17 种微量元素的总含量为 11.98 $\mu\text{g/g}$ （表 2）。其中，Al、Ti 和 Li 为主要杂质元素，含量分别为 9.08 $\mu\text{g/g}$ 、1.08 $\mu\text{g/g}$ 和 0.60 $\mu\text{g/g}$ 。碱金属和碱土金属 Na、K、Ca、Mg 的含量分别为 0.11 $\mu\text{g/g}$ 、0.29 $\mu\text{g/g}$ 、0.36 $\mu\text{g/g}$ 和 0.07 $\mu\text{g/g}$ ；过渡元素 Fe 的含量为 0.26 $\mu\text{g/g}$ 。在相关图解上，这八种关键元素的含量全部落在 Müller et al. (2012) 划定的高纯石英范围内（图 7）。此外，小花果石英砂含有极少量的 B、P、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Zr 和 Zn 元素，含量分别为 0.03 $\mu\text{g/g}$ 、0.02 $\mu\text{g/g}$ 、0.01 $\mu\text{g/g}$ 、0.01 $\mu\text{g/g}$ 、0.01 $\mu\text{g/g}$ 、0.01 $\mu\text{g/g}$ 、0.01 $\mu\text{g/g}$ 、0.01 $\mu\text{g/g}$ 和 0.02 $\mu\text{g/g}$ （表 2），均小于高纯石英所规定的单元素含量上限。

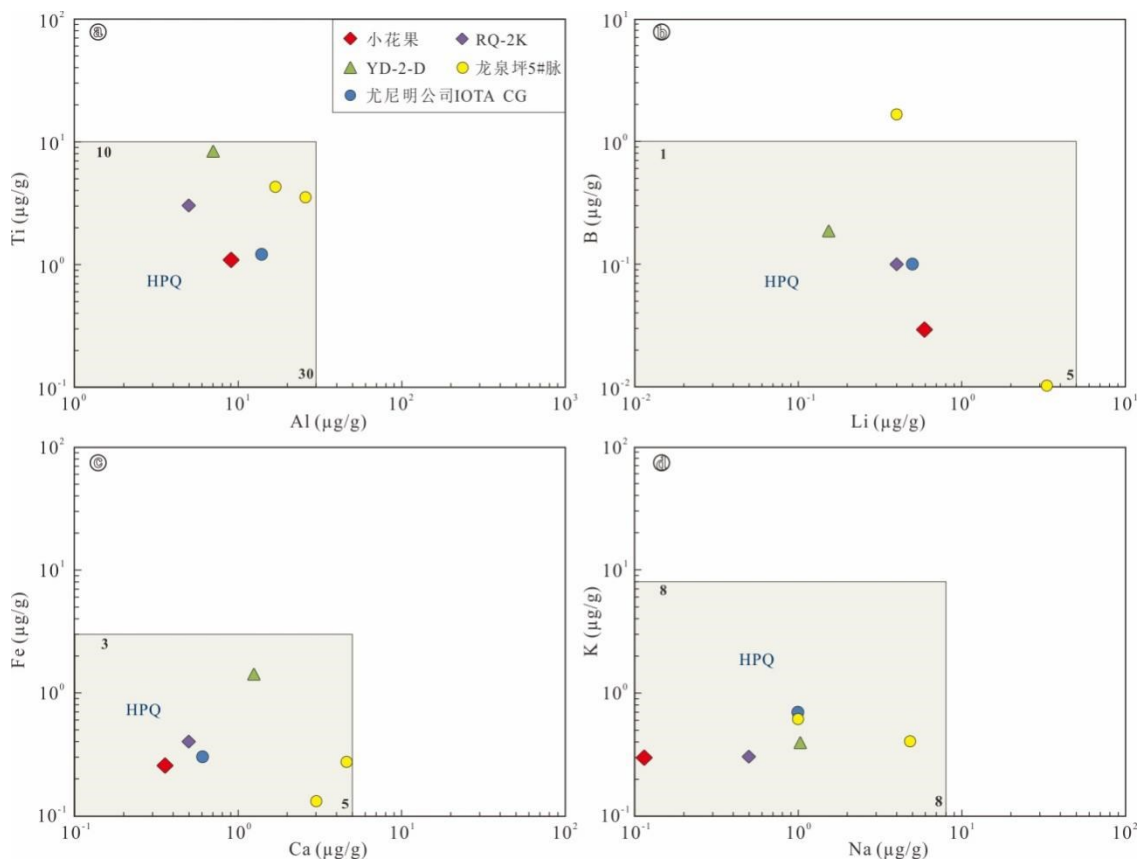


图 7 小花果提纯后石英砂化学成分图解（黄色区域为 Müller et al. 2012 定义的高纯石英）。尤尼明公司 IOTA CG 和俄罗斯 Kyshtym 矿床 RQ-2K 石英砂数据来源于周浩阳, 2025，印度北部 YD-2-D 及龙泉坪 5 号伟晶岩脉数据分别来源于王九一, 2025 和郭峰等, 2024。

Fig.7 Binary plots illustrating the chemical composition of purified quartz sand from the Xiaohuaguo deposit. The yellow field is the high-purity quartz defined by Müller et al. 2012. The data of Unimin's IOTA CG quartz sand and hydrothermal vein-type quartz sand of Russian Kyshtym deposit are from Zhou, 2025. The data of northern India's YD-2-D quartz sand and the Longquanping No.5 pegmatite vein are from Wang, 2025 and Guo et al., 2024, respectively.

4 讨论

4.1 4N8 级脉石英型高纯石英矿床

石英中的杂质元素主要以晶格元素、矿物包裹体和流体包裹体形式赋存 (Götze, 2009; 杨晓勇等, 2022)。根据石英晶体结构和元素地球化学性质, 晶格杂质主要通过等价替代、耦合替代和间隙补偿等方式进入石英中。其中, 等价替代是指 Si^{4+} 被具有相似离子半径的四价阳离子直接替代占据硅氧四面体结点位置, 如 Ti^{4+} 和 Ge^{4+} 等; 耦合替代是指相邻的两个 Si^{4+} 位点分别被 Al^{3+} 和 P^{5+} 取代以维持电荷平衡; 间隙补偿替代是指 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 和 B^{3+} 等三价阳离子替代 Si^{4+} 时, 需伴随一价阳离子 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 和 H^+ 进入晶格间隙进行电荷补偿 (Jacamon and Larsen, 2009; Götze et al., 2021)。大量的实验研究表明, 氯化焙烧可以有效降低 K 和 Na 含量, 而氧化焙烧能有效去除非金属元素 H、B 和 P (Lin et al., 2020)。然而, Al^{3+} 和 Ti^{4+} 因在硅氧四面体结构中表现出极低的扩散系数, 现有的提纯工艺对其去除效果有限 (Tailby et al., 2018)。此外, 尽管 Li^+ 具有较高的扩散系数, 但由于其常作为 Al^{3+} 替代的电荷补偿离子存在, 也难以有效剔除 (Phelps and Lee, 2020)。因此, 石英中关键晶格杂质的含量直接决定了其化学纯度的上限 (Müller et al., 2012)。LA-ICP-MS 原位分析结果显示, 小花果石英中的 Al、Ti 和 Li 含量极低, 其平均值分别为 7.68 $\mu\text{g/g}$ 、1.38 $\mu\text{g/g}$ 和 0.57 $\mu\text{g/g}$ (图 6, 表 1), 表明该石英的晶格杂质元素特征符合高纯石英原料的化学纯度要求。

脉石矿物在石英原料中的赋存状态直接决定其提纯时的分离效果 (Lin et al., 2020)。一般而言, 分布于石英晶体颗粒之间的共伴生矿物可通过破碎、浮选、磁选及酸浸工艺实现有效分离。然而, 分布于石英晶体内部的包裹型微粒矿物则因嵌布特征不易除去, 最终形成工艺矿物学意义上的杂质残留 (杨晓勇等, 2022)。岩相学观察表明, 小花果石英中主要伴生矿物白云母主要呈粒间填隙式产出, 这种典型的晶界赋存特征使其具备良好的可分选性。此外, 小花果石英晶体内部还存在极少量的矿物包裹体, 如白云母、赤铁矿、钾长石和锆石等 (图 3)。这些以包裹体形式赋存的少量脉石矿物有可能残留在提纯之后的石英砂中。小花果提纯后石英砂的 Al 和 Li 含量为 9.08 $\mu\text{g/g}$ 和 0.60 $\mu\text{g/g}$, 分别略高于原位分析的平均值 7.68 $\mu\text{g/g}$ 和 0.57 $\mu\text{g/g}$, 可能与残留在石英晶体内的少量白云母和极微细粒包裹体有关。尽管如此, 但考虑到这些晶体内部的杂质矿物体积占比极小, 我们认为其对高纯石英制备的影响可忽略不计。

流体包裹体是石英结晶过程中捕获的共生流体相, 常富含 Na、K、Ca 和 Mg 等组分 (Götze et al., 2021)。大量流体包裹体的存在不仅会提高石英的杂质元素含量, 还会显著降低终端

材料的强度、改变其熔融行为，进而制约其工业应用（Haus et al., 2012）。因此，越来越多的研究者强调流体包裹体是影响高纯石英可制备性的另一关键因素（张亮等, 2024; 周浩阳, 2025）。在加工提纯过程中，机械破碎和高温煅烧是去除流体包裹体的主要手段（Lin et al., 2020）。与面状包裹体群相比，线状或条带状包裹体群常沿晶格裂隙分布。在机械破碎中，石英颗粒易沿晶格裂隙面破碎，从而使线状或条带状流体包裹体群得以暴露（郭宜琳等, 2025）。岩相学观察显示，小花果绝大多数石英颗粒内部“纯净”、流体包裹体稀少（图 4a, b），少数石英晶体中可见条带状流体包裹体群（图 4a, b, c），仅有极少量石英颗粒含面状包裹体群（图 4d）。这些特征表明，小花果石英原料中的绝大多数流体包裹体可以通过现有提纯工艺有效去除。经提纯后，小花果石英中的 Na、K 和 Ca 元素含量显著低于尤尼明 IOTA CG、俄罗斯 RQ、印度北部 YD-2-D 及龙泉坪 5 号伟晶岩脉等高纯石英砂（图 7），也进一步证实了其流体包裹体具有良好的去除性（Götze et al., 2021）。

根据《高纯石英矿石品级划分》行业标准，光伏坩埚内层用高纯石英砂杂质元素总含量应 $\leq 20 \mu\text{g/g}$ ，钾、锂和钠含量总和 $< 2\mu\text{g/g}$ ，铁、钙、镁、镍、铜和钴含量总和 $< 2\mu\text{g/g}$ ，且流体包裹体视域面积占比 $< 0.8\%$ 的颗粒数占总颗粒数 $\geq 95\%$ （张亮等, 2025）。经提纯后，小花果热液脉型石英表现出较低的微量元素含量，杂质总含量为 $11.98 \mu\text{g/g}$ ，Na + Li + K 含量为 $1\mu\text{g/g}$ ，Fe + Ca + Mg + Ni + Cu + Co 含量为 $0.72 \mu\text{g/g}$ ，均优于光伏坩埚内层用高纯石英杂质元素含量标准。尽管本次研究未开展提纯后石英砂流体包裹体分布密度的系统评估，但基于以下三方面的考虑，本文认为小花果脉石英仍然具备运用于高端科技领域的巨大潜力：①在不同视域下，提纯后的小花果石英砂与尤尼明公司用于生产内层坩埚的 IOTA CG 型高纯石英砂的粒径和形貌高度相似，绝大部分石英颗粒表面干净，仅少量石英颗粒含有残留的稀疏面状包裹体群（图 8）；②在相似的粒径下，提纯后 ICP-OES 测试的小花果石英中 Na、K 和 Ca 等包裹体杂质含量明显低于 IOTA CG 高纯石英砂（图 7），也从侧面印证了其包裹体更为稀少的特征；③根据湖北鑫阳半导体科技有限公司的消息报道，该公司应用十堰市郧阳区的脉石英样品已成功制备出光伏及半导体（<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1852199516231546426&wfr=spider&for=pc>），虽然不能确定原料是否来源于小花果矿床，但该案例证实了区域脉石英型高纯石英具备高端运用的巨大潜力。

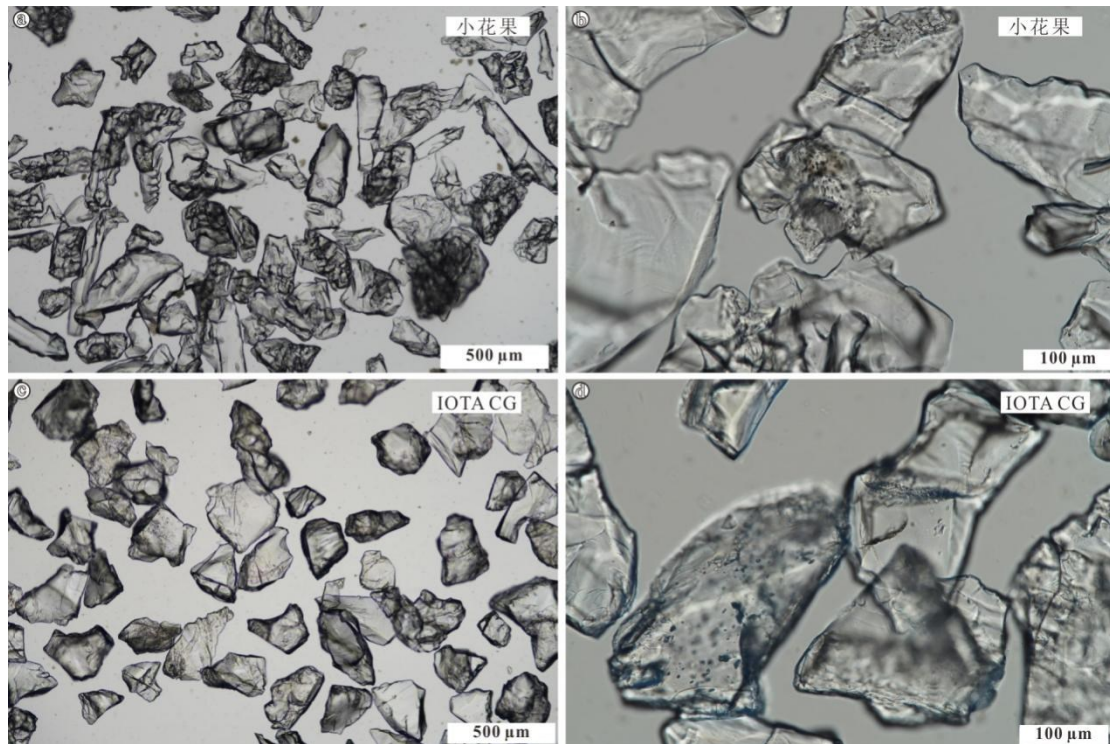


图 8 不同视域下小花果提纯后石英砂与尤尼明公司 IOTA CG 高纯石英砂对比

Fig.8 Comparison of the optical characteristics of Xiaohuaguo quartz sand and Unimin's IOTA CG HPQ sand at different fields of view.

4.2 对区域找矿勘查的指示

构造样式和变质年代学研究结果表明,南秦岭武当隆起自古生代以来主要经历了 3 期重要的构造变形事件,包括:志留纪至二叠纪的 NS 向伸展滑脱构造、早三叠世从北往南的逆冲推覆构造及随后的走滑运动(胡健民等, 2000; 秦正永等, 2005)。其中,志留纪至二叠纪的伸展滑脱构造主要发育近 SN 向的顺层滑脱变形、小尺度的平卧褶皱和顺层剪切作用;早三叠世的逆冲推覆构造则是区内最强烈的构造活动,以发育 NW 向、NE 向和 EW 向的倒转褶皱、叠瓦状构造和韧性-脆性断裂为特征,是华北板块向扬子板块俯冲碰撞的产物;而走滑运动则是以叠加早三叠世逆冲推覆构造,发育脆性断裂为主(秦正永等, 2005; 林长谦等, 2006)。强烈的构造活动形成了以银洞坡和许家坡为代表的三叠纪造山型金银矿床(Yue et al., 2014)。尽管本次研究并未获得小花果的有效成矿年龄,但考虑到小花果石英中的两相包裹体主要由气相 CO_2 和液态 H_2O 组成,少数为纯 H_2O 两相包裹体(图 5),与变质流体的富 CO_2 特征相似,本文认为其成矿作用与区域变质作用密切相关。此外,大量的地质年代学研究表明,南秦岭武当地区的中-酸性岩浆活动主要集中于新元古代(Ling et al., 2008; Wang et al., 2016; 张维峰等, 2018),而寒武纪以来并无相关研究报道。小花果石英矿

体呈脉状穿插寒武-奥陶纪地层，暗示其不太可能由中-酸性岩浆演化派生而来。相反，在强烈的构造活动中，变质流体常会淋滤出围岩中的 SiO_2 ，并迁移至断裂、褶皱转折端等构造有利部位富集沉淀形成热液脉型石英。例如，俄罗斯乌拉尔南部的 Kyshtym 热液脉型高纯石英矿床，其形成过程为第一期变质作用驱动硅质活化形成含矿热液，沿构造运移并沉淀形成早期初始纯度较高的石英脉，为后续的变质提纯作用奠定了物质基础 (Götze et al., 2017)。

关于区域变质作用对石英纯净度的影响，近年来已取得了显著的研究进展 (Götze et al., 2017; Zhou et al., 2023; 郭宜琳等, 2025; 贾龙等, 2026)。总体而言，绿片岩相至角闪岩相的变质改造不仅可以通过晶格重构有效降低石英中 Al^{3+} 、 Ti^{4+} 等晶格杂质含量，还可以促进包裹体向晶界迁移，进而提高其可去除性 (Müller et al., 2012; Zhou et al., 2023; 张亮等, 2024; 吴福元等, 2025; 贾龙等, 2026)。例如，挪威 Tysfjord 地区未变形、弱变形和强变形伟晶岩中的石英，其 Al、Ti、Li、Ge 和 B 等五种杂质元素的总含量逐渐降低，且流体包裹体由面状分布转变为线状展布 (Zhou et al., 2023)；美国 Spruce Pine 白岗岩-伟晶岩因经历高绿片岩相的变质作用，石英颗粒发生位错蠕变、颗粒边界迁移等塑性变形，进而促进杂质元素从晶格排除 (郭宜琳等, 2025)；俄罗斯乌拉尔南部的 Kyshtym 热液脉型石英在第二期角闪岩相变质作用下，原生石英发生晶体缺陷愈合、晶格重组及流体包裹体分解，从而使其纯度得到进一步的提升 (Götze et al., 2017)；我国北秦岭龙泉坪 10 号伟晶岩脉在持续漫长的退变质冷却和韧性变形作用下，石英发生重结晶和定向排列，促进了晶格杂质元素向外扩散和包裹体重新分布 (贾龙等, 2026)。基于变质矿物组合及矿物对成分温度计的研究，王东升等 (2019) 指出：南秦岭武当地区十堰-白河断裂南北两侧岩石地层单元均发生了绿片岩相变质作用，发育有白云母、黑云母、钠长石、绿泥石、绿帘石和石榴石等矿物组合，变质温度分别为 322~540°C 和 344~431°C，与三叠纪造山过程密切相关。这一变质程度与前人总结的高纯石英所需的绿片岩相至角闪岩相变质条件一致，暗示南秦岭武当地区三叠纪的变质作用有利于该区石英的纯化。小花果石英所表现出的动态重结晶及流体包裹体线状展布等显微特征，与挪威 Tysfjord、美国 Spruce Pine 及俄罗斯 Kyshtym 等经历变质纯化的高纯石英矿床高度相似，进一步表明南秦岭武当地区具备有利的变质提纯条件。

通过详细的构造解析，秦正永等 (2005) 认为南秦岭武当隆起内发育的两厢断裂、十堰-白河断裂和竹山断裂是区域性的主干构造。在多期的构造活动中，这些主干断裂及其次级构造为成矿流体的迁移提供了大量的导矿和容矿空间。例如，区内的银洞沟和许家坡金-银矿床的矿体形态主要受逆冲推覆构造形成的断裂和次级褶皱控制 (李金发等, 2003; Yue et al., 2014)，而蒿坪和小花果脉石英则产于 NW 向断裂旁 (张维峰等, 2026)。此外，南秦岭武

当地区在早三叠世华北板块与扬子板块碰撞造山过程中,发育了强烈的逆冲推覆构造及伴生的绿片岩相变质作用(王东升等, 2019)。这一变质条件能够通过晶格重构降低 Al^{3+} 、 Ti^{4+} 等杂质含量,并促进流体包裹体向晶界迁移。结合上述区域构造-变质特征及国内外高纯石英成矿实例,尽管目前区内缺乏更多高纯石英矿床的案例报道,我们认为南秦岭武当隆起仍是我国寻找脉石英型高纯石英矿床的理想区域。尤其是 NW 向断裂旁侧发育绿片岩相变质的脉石英产地,具有寻找高纯石英资源的良好前景。

5 结论

(1) 小花果热液脉型石英提纯后杂质总含量为 $11.98 \mu\text{g/g}$,且提纯后石英砂的粒径、形貌和残留的流体包裹体特征与尤尼明公司 IOTA CG 型高纯石英砂高度相似,具备运用于高端科技领域的巨大潜力。

(2) 南秦岭武当隆起广泛发育北西向主干断裂及次级断裂,可以为变质流体迁移和石英脉就位提供了良好空间;该区早三叠世逆冲推覆构造伴生的绿片岩相变质作用,符合高纯石英所需的变质纯化条件。因此,该地区是我国寻找脉石英型高纯石英矿床的理想区域。

致 谢:

本文受湖北省自然科学基金项目(批准号: 2023AFD207; 2025AFB962)和中国地质调查局项目(批准号: DD20250208809)的共同资助。衷心感谢中国科学技术大学杨晓勇和夏梅教授对石英提纯实验的帮助,以及湖北省地质局第八地质大队秦璞高级工程师和中国地质大学(武汉)在读硕士研究生曾洪涛在野外工作中的大力帮助。非常感谢两位匿名评审专家及编辑部的宝贵修改意见。

参考文献(References):

- 高树学, 颜玲亚, 陈正国, 等. 2020. 我国脉石英成矿区带初步划分. 中国非金属矿工业导刊, 143, (05): 5-9.
- 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. 矿物岩石, 44(4): 71-82.

- 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. 岩石学报, 41(10), 3469-3489.
- 胡健民, 孟庆任, 白武明, 等. 2002. 南秦岭构造带中-晚古生代伸展构造作用. 地质通报, 21(8): 471-477.
- 贾龙, 樊献科, 张海啟, 等. 2026. 北秦岭伟晶岩型高纯石英矿床铌钽铁矿和白云母同位素年代学及其地质意义—以龙泉坪 10 号脉为例. 地质论评, 接收待刊, DOI:10.16509/j.georeview. 2026.01.065.
- 李金发, 张业明, 罗玉祖. 2003. 鄂西北许家坡金银矿床地质地球化学特征及成因分析. 地质科技情报, 22(04): 75-79.
- 林长谦, 胡明, 何洪涛. 2006. 湖北武当地区银金多金属矿控矿条件及找矿方向. 地质找矿论丛, 21(2): 104-108.
- 罗小南, 索忠连, 茹朋, 等. 2023. 河南省高纯石英资源现状及产业发展的思考. 矿产勘查, 14(11): 2271-2277.
- 秦正永, 陈林栋, 刘兴义, 等. 2005. 武当地区构造类型及其控矿作用. 地质调查与研究, 28(01): 16-24.
- 田冲, 寿立永, 崔拥军. 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. 岩石矿物学杂志, 41(6): 1147-1158.
- 万会, 吴裕根, 王钰, 等. 2026. 矿产地质勘查规范 高纯石英矿. 中华人民共和国地质矿产行业标准, 1-30.
- 王东升, 王宗起, 王刚, 等. 2019. 南秦岭构造带十堰—武当地区岩石变质作用. 地球科学与环境学报, 41(04): 379-395.
- 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.
- 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. 岩石矿物学杂志, 44(1): 152-165.
- 王建平, 李开文, 张正伟, 等. 2025. 东秦岭白岗岩型高纯石英原料矿的发现、研究与意义. 矿物岩石地球化学通报, 44(02): 448-452.
- 汪灵. 2019. 石英的矿床工业类型与应用特点. 矿产保护与利用, 39(6): 39-47.
- 王云月, 邓宇峰, 詹建华, 等. 2021. 高纯石英原料特征和矿床成因研究现状综述. 地质论评, 67(5), 1465-1476.

- 吴福元, 刘小驰, 王佳敏, 等. 1995. 高分异花岗岩与高纯石英. 岩石学报, 41(10): 3243-3277.
- 杨晓勇, 孙超, 曹荆亚, 等. 2022. 高纯石英的研究进展及发展趋势. 地学前缘, 29(1): 231-244.
- 曾云. 1998. 湖北武当一两郧地区地质构造 基本特征及构造演化. 华南地质与矿产, 2: 60-66.
- 张海啟, 张亮, 刘磊, 等. 2022a. 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.
- 张海啟, 谭秀民, 马亚梦. 2022b. 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, 42(5): 1-7.
- 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. 岩石学报, 40(04): 1311-1326.
- 张亮, 李建国, 郭敏, 等. 2026. 高纯石英矿石品级划分. 中华人民共和国地质矿产行业标准, 1-12.
- 张维峰, 徐大良, 彭练红, 等. 2018. 武当隆起西段牌楼新元古代 A1 型花岗岩的发现及其地质意义. 地球科学, 43(7): 2389-2403.
- 张维峰, 张利国, 谢国刚, 等. 2026. 南秦岭武当地区蒿坪脉石英型高纯石英矿成因机理及其找矿潜力评价. 中国地质, 53(1), 1-15.
- 赵维佳. 2023. 我国高纯石英产业现状及资源保障分析. 中国非金属矿工业导刊, (01): 11-27.
- 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.
- Dong, Y.P., Santosh, M., 2016. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China. Gondwana Research, 29(1), 1-40.
- Frezzotti, M.L., Tecce, F., Casagli, A., 2012. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. Journal of Geochemical Exploration, 112(4): 1-20.
- Glover, A.S., Rogers, W.Z., Barton, J.E., 2012. Granitic pegmatites: storehouses of industrial minerals. Elements, 8(4): 269-273.
- Götze, J., Plötze, M., Graupner, T., et al., 2004. Trace element incorporation into quartz: A combined study by ICP-MS, electron spin resonance, cathodoluminescence, capillary ion analysis, and gas chromatography. Geochimica et Cosmochimica Acta, 68(18): 3741-3759.
- Götze, J., 2009. Chemistry, textures and physical properties of quartz geological interpretation and technical application. Mineralogical Magazine, 73(4), 645-671.

- Götze, J., Pan, Y., Müller, A., et al., 2017. Trace element compositions and defect structures of high-purity quartz from the Southern Ural Region, Russia. *Minerals*, 7(10): 1-19.
- Götze, J., Pan, Y.M., Müller, A., 2021. Mineralogy and mineral chemistry of quartz: A review. *Mineralogical magazine*, 85(5): 639-664.
- Haus, R., Prinz, S., Priess, C., 2012. Assessment of high purity quartz resources. In *Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 29-51.
- Jacamon, F., Larsen, R.B., 2009. Trace element evolution of quartz in the charnockitic Kleivan granite, SW-Norway: The Ge/Ti ratio of quartz as an index of igneous differentiation. *Lithos*, 107(3-4), 281-291.
- Lin, M., Liu, Z.Y., Wei, Y., et al., 2020. A critical review on the mineralogy and processing for high-grade quartz. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 37(6): 1627-1639.
- Ling, W.L., Ren, B.F., Duan, R.C., et al., 2008. Timing of the Wudangshan, Yaolinghe volcanic sequences and mafic sills in South Qinling: U-Pb zircon geochronology and tectonic implication [J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(14): 2192-2199.
- Liu, Y.S., Hu, Z.C., Gao, S., et al., 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical geology*, 257(1-2), 34-43.
- Mancktelow, N.S., Pennacchioni, G., 2004. The influence of grain boundary fluids on the microstructure of quartz-feldspar mylonites. *Journal of Structural Geology*, 26(1): 47-69.
- Müller, A., Ihlen, P.M., Wanvik, J.E., et al. 2007. High-purity quartz mineralisation in kyanite quartzites, Norway. *Mineralium Deposita*, 42: 523–535.
- Müller, A., Wiedenbeck, M., Flem, B., et al. 2008. Refinement of phosphorus determination in quartz by LA-ICP-MS through defining new reference material values. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32(3): 361-376.
- Müller, A., Wanvik, J.E., Ihlen, P.M., 2012. Petrological and chemical characterisation of high-purity quartz deposits with examples from Norway. In *Quartz: deposits, mineralogy and analytics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 71-118.
- Nie, H., Wan, X., Zhang, H., et al., 2016. Ordovician and Triassic mafic dykes in the Wudang terrane: Evidence for opening and closure of the South Qinling ocean basin, central China.

Lithos, 266(10): 1-15.

Passchier, C.W., Trouw, R.A.J., 2005. Microtectonics. Heidelberg: Springer, 25-66.

Phelps, P.R., Lee, C.T.A., 2022. Extreme lithium isotope fractionation in quartz from the Stewart pegmatite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 336(8): 208-218.

Tailby, N.D., Cherniak, D.J., Watson, E.B., 2018. Al diffusion in quartz. *American Mineralogist*, 103(6): 839-847.

Wang, J.Y., Xie, Z.F., Wang, C.L., et al. 2022. Trace Element Concentrations and Mineralogy of Quartz Vein Deposits from Southeastern Hubei Province, China. *Minerals*, 12(7): 814-831.

Wang, R.R., Xu, Z.Q., Santosh, M., et al., 2016. Late Neoproterozoic magmatism in South Qinling, Central China: Geochemistry, zircon U-Pb-Lu-Hf isotopes and tectonic implications. *Tectonophysics*, 2016(5), 683: 43-61.

Xia, M., Sun, C., Yang, X., Chen, J., 2023. Assessment of Gold-Bearing Quartz Vein as a Potential High-Purity Quartz Resource: Evidence from Mineralogy, Geochemistry, and Technological Purification. *Minerals*, 13(2): 261-287.

Yue, S.W., Deng, X.H., Bagas, L., 2014. Geology, isotope geochemistry, and ore genesis of the Yindonggou Ag-Au (-Pb-Zn) deposit, Hubei Province, China. *Geological Journal*, 49(4-5): 442-62.

Zhang, W., Chen, W.T., Gao, J.F., et al., 2019. Two episodes of REE mineralization in the Qinling Orogenic Belt, Central China: In-situ U-Th-Pb dating of bastnäsite and monazite. *Mineralium Deposita*, 54(8): 1265-1280.

Zhang, Z.Y., Zhu, L.K., Li, J.G., et al. 2025. Water-fluxed crustal melting controlled the formation of pegmatite-type high-purity quartz deposits: New insight from geochemistry, monazite U–Pb–Nd isotopes, and thermodynamic modeling. *Ore Geology Reviews*, 107005.

Zhou, H.Y., 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.

表 1 小花果矿床石英 LA-ICP-MS 微区成分特征

Table 1 LA-ICP-MS in-situ trace elements analysis data of quartz from the Xiaohuaguo deposit

矿体编号	分析点位	元素含量 (μg/g)											
		Li	Be	B	Na	Mg	Al	K	Ti	Mn	Fe	Ga	Ge
I	D013-1-1	0.47	bdl	bdl	3.61	0.33	8.75	bdl	1.41	1.90	bdl	0.13	1.71
	D013-1-2	0.83	bdl	bdl	2.70	0.36	9.47	bdl	1.28	0.88	7.17	bdl	1.78
	D013-1-3	0.75	bdl	bdl	4.04	0.54	8.58	bdl	1.68	0.62	bdl	0.20	0.28
	D013-1-4	0.49	bdl	bdl	3.15	0.46	7.79	bdl	1.43	1.53	bdl	0.10	1.40
	D013-1-5	0.63	bdl	bdl	8.13	0.79	6.95	0.24	0.57	1.07	9.44	0.22	1.21
	D013-1-6	0.52	bdl	1.57	4.45	0.59	7.51	bdl	1.75	0.87	bdl	0.08	1.49
	D013-1-7	0.40	bdl	2.05	1.65	0.11	7.42	bdl	1.11	1.20	bdl	bdl	1.26
	D013-1-8	0.45	bdl	bdl	1.72	0.14	7.47	bdl	0.85	1.48	12.3	0.34	bdl
	D013-1-9	0.45	bdl	1.74	1.27	0.18	7.44	bdl	1.53	2.07	bdl	0.17	1.21
	D013-1-10	0.58	bdl	bdl	0.74	0.07	6.89	bdl	2.06	1.03	bdl	0.18	2.38
	D013-1-11	0.37	bdl	bdl	1.03	0.11	7.77	bdl	1.04	2.11	bdl	0.11	1.22
	D013-1-12	0.57	bdl	2.73	1.19	0.11	7.53	bdl	0.17	1.41	bdl	0.18	1.99
	D013-1-13	0.51	bdl	bdl	2.50	0.06	9.31	bdl	0.88	1.41	bdl	0.10	1.56
	D013-1-14	0.66	bdl	bdl	1.53	0.20	7.69	0.61	0.84	2.30	bdl	0.12	2.57
	D013-1-15	0.47	bdl	0.26	5.82	0.56	9.12	bdl	1.56	1.51	22.1	0.28	bdl
	D013-2-1	0.60	bdl	bdl	2.38	0.18	8.19	bdl	0.88	1.25	14.6	0.05	0.82
	D013-2-2	0.83	0.04	1.72	1.96	0.12	8.10	bdl	2.69	1.25	1.27	0.08	0.61
	D013-2-3	0.58	bdl	0.13	3.23	0.27	7.83	bdl	1.22	1.45	bdl	0.19	0.77
	D013-2-4	0.61	bdl	2.17	1.63	0.33	7.51	0.02	1.16	2.15	bdl	0.25	1.40
	D013-2-5	0.63	bdl	bdl	2.91	0.22	7.62	0.36	2.06	0.73	bdl	0.11	0.39
	D013-2-6	0.60	bdl	0.19	1.30	0.26	7.15	bdl	1.22	1.86	12.5	0.27	2.12

II	D013-2-7	0.47	bdl	0.55	1.53	0.20	7.40	bdl	1.38	1.47	bdl	0.08	bdl
	D013-2-8	0.40	bdl	0.07	1.21	0.18	6.96	bdl	0.40	2.10	0.81	0.01	2.35
	D013-2-9	0.78	bdl	bdl	1.42	0.17	7.26	bdl	1.93	1.35	bdl	0.21	1.94
	D013-2-10	0.66	bdl	bdl	2.33	0.23	9.60	bdl	1.00	2.21	10.5	0.01	0.79
	D013-2-11	0.79	bdl	bdl	2.60	0.22	8.91	bdl	1.86	2.29	6.98	0.08	3.03
	D013-2-12	0.85	0.10	2.00	1.64	0.21	8.81	bdl	1.88	2.39	1.96	0.18	0.55
	D013-2-13	0.45	bdl	bdl	2.67	0.39	7.57	2.83	3.23	1.14	0.50	0.21	0.70
	D013-2-14	0.42	0.10	bdl	2.86	0.27	7.57	bdl	bdl	1.65	7.32	0.18	1.54
	D013-2-15	0.64	bdl	2.14	1.84	0.63	7.85	0.02	0.34	2.46	1.43	0.10	0.01
	D013-3-1	0.36	bdl	3.61	1.00	0.20	8.91	bdl	1.25	1.37	0.86	0.20	1.79
	D013-3-2	0.62	bdl	1.95	2.12	0.31	8.03	bdl	1.64	1.21	16.4	0.17	2.11
	D013-3-3	0.69	bdl	1.74	2.08	0.14	6.98	bdl	1.47	1.52	bdl	0.11	1.47
	D013-3-4	0.16	bdl	0.69	2.17	0.16	7.04	bdl	1.53	1.51	bdl	0.20	0.39
	D013-3-5	0.67	bdl	bdl	2.92	0.20	7.30	bdl	bdl	1.01	8.77	bdl	1.56
	D013-3-6	0.30	bdl	0.03	1.32	0.20	7.61	bdl	3.45	1.17	2.20	0.15	1.77
	D013-3-7	0.55	bdl	0.61	1.48	0.15	7.81	bdl	0.29	1.50	bdl	bdl	0.09
	D013-3-8	0.56	bdl	bdl	1.65	0.12	7.40	bdl	2.64	2.21	bdl	0.14	3.24
	D013-3-9	0.66	bdl	bdl	2.77	0.20	7.07	bdl	1.53	1.43	bdl	0.10	2.77
	D013-3-10	0.60	bdl	1.11	2.28	0.20	8.29	bdl	bdl	1.28	bdl	bdl	0.50
	D013-3-11	0.50	0.09	bdl	5.51	0.38	8.25	bdl	bdl	1.94	bdl	0.10	3.40
	D013-3-12	0.70	bdl	bdl	3.05	0.24	10.2	bdl	1.29	1.75	bdl	bdl	1.29
	D013-3-13	0.25	bdl	0.09	0.96	0.06	7.73	bdl	1.71	0.76	bdl	0.15	3.29
	D013-3-14	0.62	bdl	bdl	2.09	0.18	7.22	bdl	1.12	2.28	bdl	bdl	2.59
	D013-3-15	0.41	0.06	0.86	1.41	0.04	6.88	bdl	2.56	1.40	13.5	0.04	3.39
	D013-4-1	0.70	bdl	1.50	1.62	0.21	7.02	bdl	2.06	1.61	bdl	0.06	0.55
	D013-4-2	0.66	bdl	3.14	1.01	0.07	6.37	bdl	2.39	2.29	15.0	0.23	2.46

D013-4-3	0.48	bdl	0.63	1.77	0.12	6.79	bdl	1.84	1.83	bdl	0.27	0.48
D013-4-4	0.46	bdl	bdl	0.40	0.04	6.65	0.18	3.32	1.64	bdl	0.01	2.86
D013-4-5	0.44	bdl	2.10	1.20	0.09	6.43	bdl	1.81	1.58	0.44	0.25	1.92
D013-4-6	0.57	bdl	bdl	0.89	0.01	7.78	bdl	0.17	1.56	7.84	0.23	0.36
D013-4-7	0.60	bdl	bdl	1.18	0.14	8.17	0.57	1.24	1.48	bdl	0.17	2.73
D013-4-8	0.55	bdl	1.05	0.68	0.01	6.36	1.45	1.06	1.58	bdl	0.14	2.61
D013-4-9	0.57	bdl	bdl	1.49	0.22	7.40	bdl	1.26	1.07	11.7	0.01	0.69
D013-4-10	0.46	bdl	bdl	0.46	0.05	6.56	bdl	1.47	1.19	9.33	0.08	bdl
D013-4-11	0.60	bdl	bdl	1.32	0.23	8.24	bdl	bdl	2.33	5.24	0.00	1.30
D013-4-12	0.69	bdl	bdl	1.15	0.13	6.26	0.92	1.22	1.62	bdl	0.14	3.61
D013-4-13	0.76	bdl	1.72	1.57	0.17	8.09	bdl	2.49	1.67	2.69	0.28	0.83
D013-4-14	0.60	bdl	bdl	1.77	0.11	7.43	bdl	2.37	1.58	bdl	0.14	3.32
D013-4-15	0.63	bdl	bdl	1.64	0.20	6.82	bdl	bdl	1.84	19.8	bdl	0.86

备注： bdl = 低于检出限

表 2 提纯之后小花果石英砂 ICP-OES 杂质元素含量特征

Table 2 Trace element concentrations for purified quartz samples from the Xiaohuaguo deposit

样品	Al	B	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Na	Ni	Ti	Zr	Zn	P	total
	concentrations (μg/g)																	
小花果	9.08	0.03	0.36	0.01	0.01	0.01	0.26	0.29	0.60	0.07	0.01	0.11	0.01	1.08	0.01	0.02	0.02	11.98
IOTA CG	14.0	0.10	0.60	ud	0.01	0.02	0.30	0.70	0.50	0.04	0.03	0.90	ud	1.20	ud	ud	ud	18.40
龙泉坪 5 号	16.5	0.01	3.05	\	0.00	0.05	0.13	0.62	3.34	0.21	0.14	1.00	0.04	4.35	0.01	\	0.01	29.50
伟晶岩脉	26.3	1.67	4.72	\	0.08	0.16	0.28	0.40	0.40	0.09	0.31	4.84	0.00	3.55	0.02	\	0.02	42.81
印度 YD-2-D	7.06	0.19	1.25	\	0.00	0.08	1.41	0.39	0.15	0.05	0.04	1.03	0.01	8.13	\	0.01	0.43	19.62
RQ-2K 石英砂	5.00	0.10	0.50	\	0.10	0.10	0.40	0.30	0.40	0.20	0.01	0.50	0.01	3.00	\	\	\	10.62
Müller et al. (2012) 定义的高纯石英	30.00	1.00	5.00	ud	ud	ud	3.00	8.00	5.00	ud	ud	8.00	ud	10.00	ud	ud	2.00	50.00

备注: ud = 未定义