

doi: 10.12029/gc20220809002

赵海波, 王红杰, 张勇, 马驰, 朱黎宽. 2024. 东秦岭伟晶岩型高纯石英矿地球化学、锆石 U-Pb 及 Hf 同位素研究: 对高纯石英找矿方向的探讨[J]. 中国地质, 51(1): 42-56.

Zhao Haibo, Wang Hongjie, Zhang Yong, Ma Chi, Zhu Likuan. 2024. Geochemistry, zircon U-Pb and Hf isotopes of the high-purity pegmatite-quartz deposits in the Eastern Qinling and discussion on its prospecting direction[J]. Geology in China, 51(1): 42-56(in Chinese with English abstract).

# 东秦岭伟晶岩型高纯石英矿地球化学、锆石 U-Pb 及 Hf 同位素研究: 对高纯石英找矿方向的探讨

赵海波<sup>1,2</sup>, 王红杰<sup>2,3,4</sup>, 张勇<sup>5,6</sup>, 马驰<sup>2,3</sup>, 朱黎宽<sup>2,3</sup>

(1. 中国地质调查局西宁自然资源综合调查中心, 青海 西宁 810000; 2. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006; 3. 自然资源部高纯石英资源开发利用工程技术创新中心, 河南 郑州 450006; 4. 合肥工业大学, 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 5. 东华理工大学, 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 6. 东华理工大学, 地质调查研究院, 江西 南昌 330013)

**摘要:**【研究目的】高纯石英是战略性新兴产业的关键基础材料, 是世界稀缺的战略性矿产资源。目前美国以 Spruce-Pine 花岗伟晶岩作为原料生产的 4N8 及以上高端石英砂产品几乎垄断国际市场。东秦岭 4N 级伟晶岩型高纯石英矿点的发现为研究高纯石英形成机制、实现找矿突破和建立成矿模型提供了难得的机遇。【研究方法】通过对东秦岭新发现的伟晶岩型高纯石英矿点开展野外调查, 并与美国 Spruce-Pine 高纯石英矿床伟晶岩开展岩石地球化学、锆石 U-Pb 同位素年代学和 Hf 同位素等方面的对比研究。【研究结果】东秦岭 10 号高纯石英矿形成于早泥盆世, 锆石 U-Pb 年龄为(406.8±0.8)Ma, 稍早于美国 Spruce-Pine 的高纯石英花岗伟晶岩形成时代。东秦岭高纯石英矿点伟晶岩与美国 Spruce-Pine 高纯石英矿床伟晶岩形成温度均为 600℃ 左右。东秦岭高纯石英矿点伟晶岩与美国 Spruce-Pine 高纯石英矿床伟晶岩具有相似的岩石地球化学特征, 表现 I 型花岗岩和高分异演化特征, 源区物质来源既有下地壳, 也有幔源物质。仅通过对东秦岭高纯石英矿点伟晶岩和灰池子花岗岩体空间关系、形成时代和岩石地球化学特征, 是不足以完全反演源区特征及成岩成矿过程, 对于东秦岭高纯石英矿点伟晶岩和灰池子花岗岩体是否存在同源演化仍需要进一步研究。【结论】东秦岭与美国 Spruce-Pine 高纯石英矿床在花岗岩类型、岩浆特征和形成温度等方面具有相似性, 为进一步揭示高纯石英成矿地质背景和实现找矿突破提供理论依据。

**关键词:** 岩石地球化学; 锆石 U-Pb; Hf 同位素; 高纯石英; 伟晶岩; 矿产勘查工程; 东秦岭

**创新点:** 本文基于在东秦岭新发现的伟晶岩型高纯石英矿床, 结合美国 Spruce-Pine 高纯石英矿床进行年代学和岩石地球化学等对比研究, 并利用石英选冶提纯过程中极难去除类质同象杂质问题进行反演, 丰富了高纯石英成矿理论, 具有重大的理论和现实意义。

中图分类号: P611 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)01-0042-15

## Geochemistry, zircon U-Pb and Hf isotopes of the high-purity pegmatite-quartz deposits in the Eastern Qinling and discussion on its prospecting direction

收稿日期: 2022-08-09; 改回日期: 2022-12-08

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20220978、DD20190186、DD20221698)和国家自然科学基金项目(42062006)联合资助。

作者简介: 赵海波, 1986 年生, 男, 硕士, 副研究员, 从事区域地质矿产调查与研究; E-mail: tiger\_zhaobb@163.com。

通讯作者: 王红杰, 1990 年生, 男, 博士生, 助理研究员, 从事区域地质及造山带研究; E-mail: cughongjie@163.com。

ZHAO Haibo<sup>1,2</sup>, WANG Hongjie<sup>2,3,4</sup>, ZHANG Yong<sup>5,6</sup>, MA Chi<sup>2,3</sup>, ZHU Likuan<sup>2,3</sup>

(1. Xining Center of Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Xining 810000, Qinghai, China; 2. Zhengzhou Institutes of Multipurpose Utilization of Mineral Resource, China Academy of Geological Sciences, Zhengzhou 450006, Henan, China; 3. High Purity Quartz Resource Development and Utilization Engineering Technology Innovation Center, Ministry of Natural Resources, Zhengzhou 450006, Henan, China; 4. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 5. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 6. Institute of Geological Survey, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

**Abstract:** This paper is the result of mineral exploration engineering.

**[Objective]** As the world's scarce strategic mineral resource, high-purity quartz is the key basic material of strategic emerging industries. Spruce-Pine granitic pegmatite was used as raw material by the United States to produce high-end quartz sand products, which were better than the quality of 4N8, and almost monopolized the international market. The discovery of 4N class high-purity pegmatite-quartz deposits in Eastern Qinling provides a rare opportunity to study the formation mechanism of high purity quartz, realize prospecting breakthrough and establish metallogenic model. **[Methods]** Based on the field investigation of the newly discovered high-purity pegmatite-quartz deposits in the Eastern Qinling Mountains, the geochemistry, zircon U-Pb isotope chronology and Hf isotope of pegmatite deposits in Spruce-Pine high-purity quartz deposits in the United States were compared. **[Results]** The Eastern Qinling 10 high purity quartz deposit was formed in the Early Devonian with a zircon U-Pb age of  $(406.8 \pm 0.8)$  Ma, which is earlier than that of high purity quartz granite-pegmatite in Spruce-Pine. The formation temperature of pegmatite from high purity quartz deposit in Eastern Qinling and Spruce-Pine is about 600°C. Pegmatite from the high purity quartz deposit in the Eastern Qinling has similar geochemical characteristics to pegmatite from the high purity quartz deposit in Spruce-Pine, showing features of I-type granite and high differentiation evolution. The materials in the source area come from both lower crust and mantle. It is not enough to completely invert the characteristics of the source area and the diagenesis and mineralization process by compared the spatial relationship with formation age and petrogeochemical characteristics. Whether the pegmatite of high purity quartz deposits and Huichizi granite pluton in the Eastern Qinling have the homologous evolution still needs further study. **[Conclusions]** Compared with the granite type, magmatic characteristics and formation temperature of the high-purity quartz deposits (points) in the Eastern Qinling and Spruce-Pine are similar, which provides a theoretical basis for further revealing the geological background of high-purity quartz mineralization and achieving breakthroughs in high-purity quartz ore deposits prospecting.

**Key words:** geochemistry; zircon U-Pb; Hf isotopes; high-purity quartz; pegmatite; mineral exploration engineering; Eastern Qinling

**Highlights:** Based on newly discovered high-purity pegmatite-quartz deposits in the Eastern Qinling, the comparative study of chronology and geochemistry with the high purity quartz ore deposit in Spruce-Pine is carried out. Whereas it is very difficult to remove isomorphous impurities in the quartz purification process, this study is greatly helpful to enrich the metallogenic theory of the pegmatite-type high-purity quartz, and has important theoretical and practical significance.

**About the first author:** ZHAO Haibo, born in 1986, male, master, associate researcher, engaged in regional geology and mineral resources investigation and research; E-mail: [tiger\\_zhaohb@163.com](mailto:tiger_zhaohb@163.com).

**About the corresponding author:** WANG Hongjie, born in 1990, male, Ph.D. candidate, assistant researcher, engaged in regional geology and orogenic belt research; E-mail: [cugbhongjie@163.com](mailto:cugbhongjie@163.com).

**Fund support:** Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20220978, No.DD20190186, No.DD20221698) and the National Natural Science Foundation of China (No.42062006).

## 1 引 言

高纯石英是战略性新兴产业的关键基础材料,

广泛应用于光纤、光伏、芯片、航天航空等领域,是新一代信息产业、新能源、高端制造等战略新兴产业的关键基础材料。高纯石英最初以杂质元素总

量为判别标准,目前高纯石英国际公认标准以美国尤尼明公司(现矽比科)IOTA-CG 为标准,是 12 种元素杂质(Al、K、Na、Li、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Cr、Ni、B)的含量小于  $20 \times 10^{-6}$ 、其中碱金属(K、Na、Li)元素分别小于  $1 \times 10^{-6}$  的高技术产品。中国 4N 及以上( $\text{SiO}_2 \geq 99.99\%$ )的中—高端高纯石英完全依赖进口(顾真安等, 2019),特别是高端高纯石英(4N8,  $\text{SiO}_2 \geq 99.998\%$ )完全被美国尤尼明公司垄断,高端高纯石英矿物原料产地是美国北卡罗来纳州 Spruce-Pine 地区的花岗伟晶岩。

中国是石英储量最为丰富的国家之一,已开采利用石英矿较好的有江苏东海、安徽凤阳、湖北红安、江西修水、内蒙古乌海等地,这些石英矿储量大、品位高、易开采,但目前开采的大多数石英矿均用做生产低档的石英制品:如硅微粉、玻璃、耐火材料、碳化硅、硅铁、熔融石英、石英玻璃管等。当前,制约中国高端高纯石英资源突破主要存在两方面问题:一是对高纯石英形成的地质环境认识不足,二是缺乏对石英中杂质的去除方法的研究。近年来,中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所通过持续开展高纯石英调查评价工作,在东秦岭地区新发现可制备 4N 级伟晶岩型高纯石英矿点 20 余处,采集代表性样品经选冶提纯后石英  $\text{SiO}_2$  最高含量为 99.997%(张海敏等, 2022),并部署大比例尺填图、槽探和钻探工作,显示区域伟晶岩型高纯石英资源找矿潜力巨大,为解决高纯石英形成机制和开发人工提纯技术提供了难得的机遇。本文通过对发现的伟晶岩型高纯石英矿和美国尤尼明 Spruce-Pine 高纯石英矿石开展岩石地球化学、锆石 U-Pb 同位素年代学和 Hf 同位素等方面的研究,初步揭示了东秦岭高纯石英的成矿地质环境等问题,为高纯石英成矿机制和找矿勘查模型建立提供岩石地球化学和同位素年代学依据。

## 2 区域地质背景

秦岭造山带位于扬子陆块和华北陆块之间,东连桐柏和大别、西接祁连和昆仑造山带,构成了中国中央造山系的重要组成部分(张成立等, 2013)。北秦岭东部位于秦岭造山带核心部位,区域构造演化过程可划分为 4 个阶段:新元古代至早古生代(可能至早泥盆世),以商丹缝合带为中心的商丹洋扩

张消亡;晚古生代主要是残余海盆演化阶段;三叠纪期间由于华南与华北沿秦岭—大别陆—陆碰撞造山,造成了南北两侧的前陆盆地;从侏罗纪到第四纪,区域进入山间零星分布的断陷盆地和山前压陷盆地发育阶段(张克信等, 2015)。

受商丹断裂及朱夏断裂控制,区域广泛出露古元古代秦岭群和丹凤群(卢欣祥等, 2010),秦岭群主要是由一套片麻岩、大理岩、角闪岩和混合岩组成的深变质岩系,丹凤群主要是由基性火山岩构成的蛇绿岩,沿商丹断裂北侧分布(张国伟等, 1996)。

由于受加里东期扬子板块向华北板块的长期俯冲—碰撞造山作用的影响,区域古生代中酸性岩浆活动强烈,形成了 6000 余条不同类型花岗伟晶岩脉,其围绕加里东期花岗岩体在商南、峦庄、官坡和龙泉坪 4 个区域密集分布(图 1),Li、Be、Ta、Nb 等稀有金属、铀矿和高纯石英矿在不同区域产出,伟晶岩脉呈现自花岗岩体向外依次递变的水平分带特征(陈西京等, 1993; 卢欣祥等, 2010; 袁峰等, 2017; 杨文博等, 2019; 王江波等, 2020; 李建康等, 2021; 曾威等, 2021; Yuan et al., 2022; 蔡文春等, 2023)。多数研究者认为加里东期灰池子花岗岩是花岗伟晶岩的母岩(陈西京等, 1993; 卢欣祥等, 2010),也有一些学者认为其不是母岩(裴小利, 2017; 王江波等, 2020; Yuan et al., 2022)。

东秦岭伟晶岩型高纯石英矿主要分布于龙泉坪伟晶岩密集区(图 2)。在龙泉坪长约 15.5 km、宽 3~4 km 的范围内出露 1203 条伟晶岩脉,伟晶岩脉长度多为 100~1000 m,厚 1~5 m,产状较陡,倾角多在  $60^\circ$  左右(卢欣祥等, 2010)。龙泉坪密集区伟晶岩脉多沿背斜轴部和断裂、层间裂隙、片理面侵位,多数平行于区域构造线延伸,但也有一些为切割片理和构造线的,与古元古界秦岭群花岗片麻岩及各类变质镁铁质岩体(辉石岩、辉长岩等)呈明显的侵入接触关系(卢欣祥等, 2010)。对部分脉体采集样品进行选冶提纯实验,测试  $\text{SiO}_2$  含量多数在 99.993%~99.997%。

## 3 岩石学和岩相学特征

东秦岭龙泉坪密集区伟晶岩脉的分带性发育完整,从内向外表现为:内核(以块体石英带产出)、中间带(表现为细粒、中粒、粗粒伟晶状石英长石

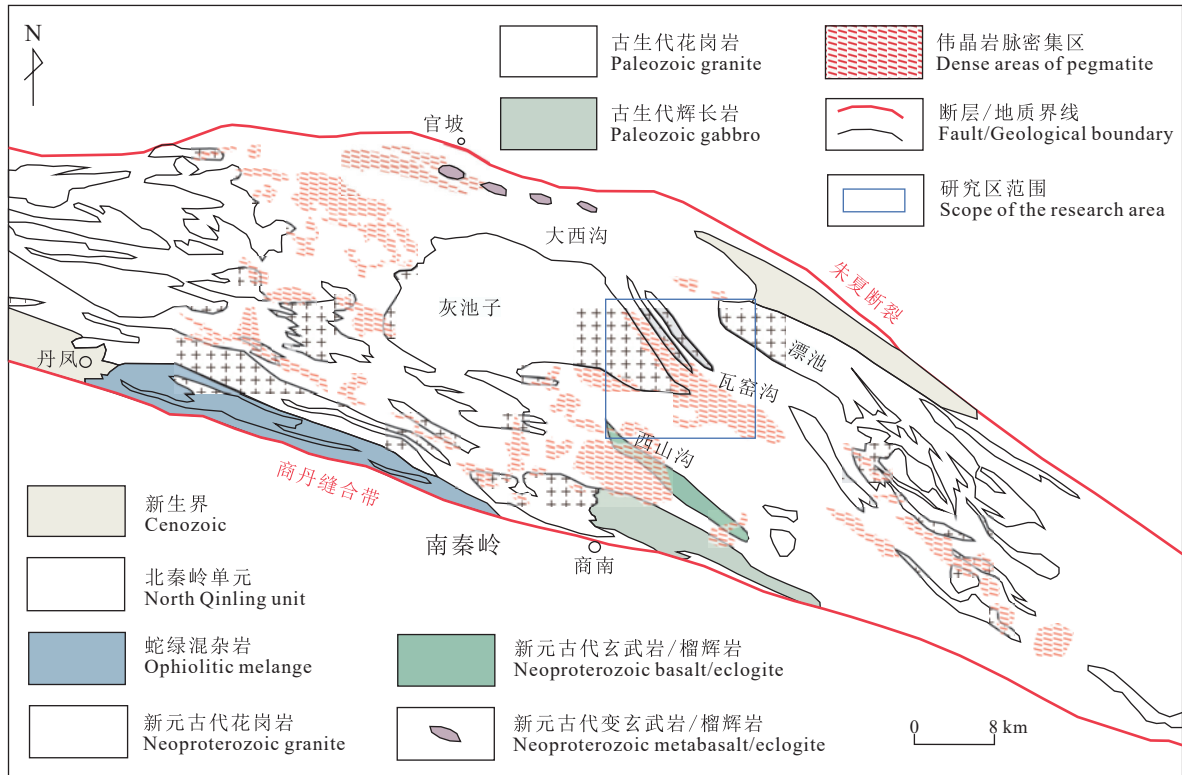


图 1 东秦岭伟晶岩分布图(据陈西京等, 1993 修改)

Fig.1 Distribution map of pegmatite in the Eastern Qinling (modified from Chen Xijing et al., 1993)

带)、外侧带(呈现花岗结构的石英长石带)、边缘带(表现出与围岩接触且含石榴石、电气石、绿柱石等花岗伟晶岩带)。伟晶岩主要矿物为: 微斜长石(条纹长石、钠长石)、更长石、钾长石、黑云母、白云母、石英; 次要矿物为: 电气石(黑色、红色)、锂辉石、磷灰石、铝云母、绿柱石、磷铝石、铀长石以及黄铁矿、辉铝矿、重晶石、锡石等数十种。

其中 10 号高纯石英矿点伟晶岩脉为二云母微斜长石型(图 3a), 岩脉长约 110 m, 宽 10~15 m, 产状  $71^\circ \angle 80^\circ$ , 侵入于古元古界石槽沟组黑云斜长片麻岩中。脉体弱风化, 呈灰白—灰黑色, 主要矿物组成钾长石、钠长石、石英、白云母, 少量黑云母、石榴子石, 矿物粒径较大, 多数在 0.5~2 cm, 部分可达 5 cm, 在伟晶岩结构分带中属中间带。矿物分析(SEM-MLA)显示主要矿物成分为: 石英(39.8%)、钾长石(18.8%)、钠长石(36.3%), 次要矿物有白云母(3.4%)、石榴子石(1.1%)、磷灰石(0.1%)、斜长石(0.1%)、黑云母(0.06%)(图 3b)、晶质铀矿(0.01%)和锆石(0.01%), 次生矿物为褐铁矿(0.16%)、白云

石(0.08%)、高岭石(0.04%)、铁白云石(0.02%)。

其中 5 号高纯石英矿点伟晶岩脉为二云母微斜长石型(图 3c), 岩脉长约 270 m, 宽 30~70 m, 倾向  $283^\circ$ , 倾角  $43^\circ \sim 52^\circ$ , 侵入于古元古界石槽沟组黑云斜长片麻岩中。脉体弱风化, 呈灰白色, 主要矿物组成钠长石、钾长石、石英、白云母, 少量黑云母、石榴子石, 矿物颗粒较大, 多数粒径在 1~2 cm, 部分可达 5 cm, 属中间带。矿物分析(SEM-MLA)显示主要矿物成分为: 石英(43.2%)、钾长石(35.2%)、钠长石(19.23%), 次要矿物有白云母(0.73%)(图 3d)、黑云母(0.15%)、石榴子石(0.43%)、斜长石(0.93%)、钼石(0.02%)、磷钇矿(0.03%), 次生矿物有磁铁矿(0.05%)。

美国 Spruce-Pine 矿曾提供全球 90% 的高纯石英砂, 其他国家少有发现类似的矿床, 对 Spruce-Pine 高纯石英矿伟晶岩进行矿物分析(SEM-MLA)分析: 更长石(40%), 石英(25%), 微斜长石(一般为条纹长石, 20%)和白云母(15%)(图 3e、f), 主要伴生矿物有黑云母、石榴子石、磷灰石、褐帘石、绿帘石、锰黝帘石、黄铁矿和磁黄铁矿等。

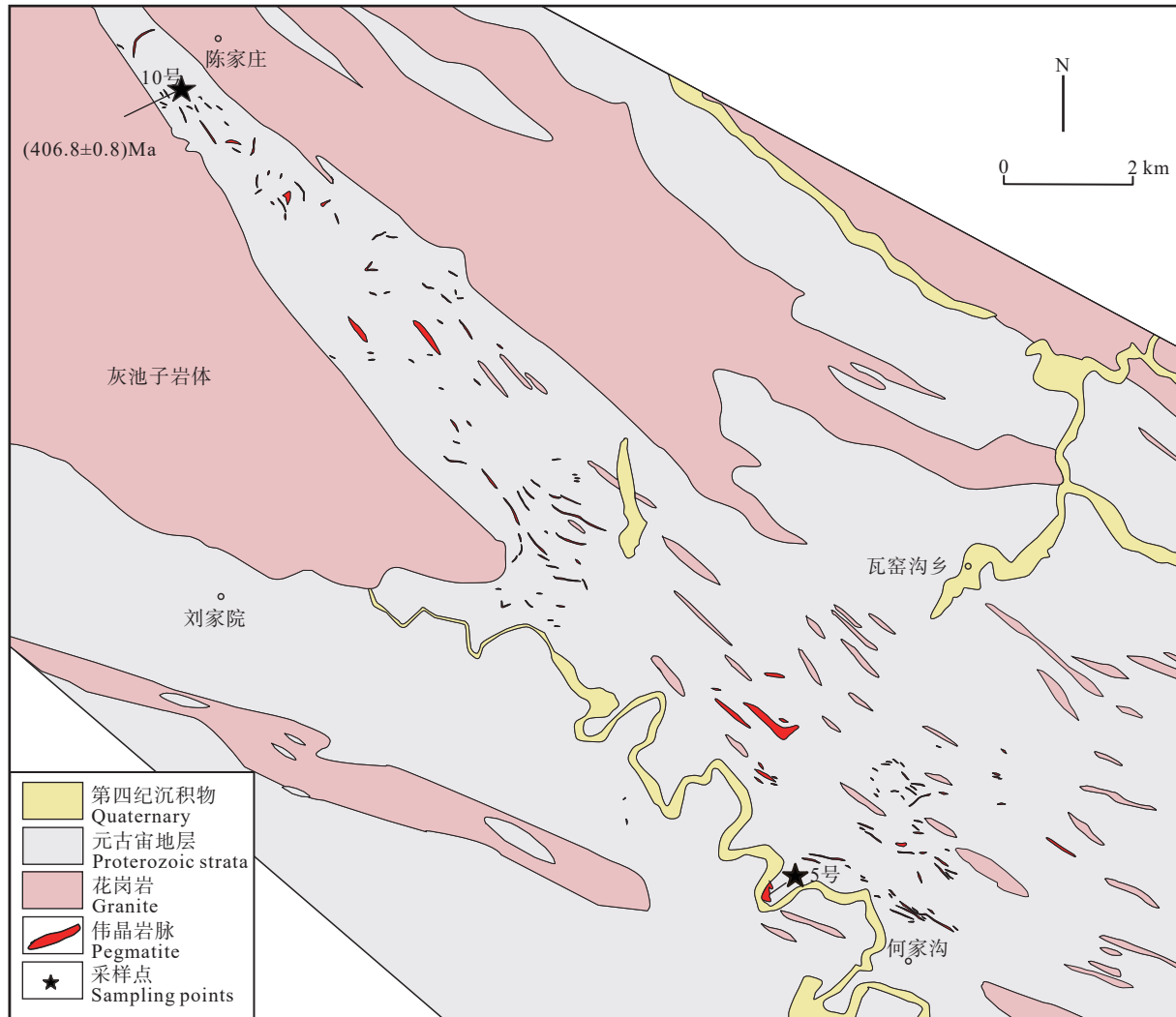


图 2 龙泉坪地区 5 号、10 号高纯石英矿点分布地质简图

Fig.2 Geological map of No.5 and No.10 high purity quartz deposit in Longquanping area

## 4 分析方法

对东秦岭 5 号、10 号高纯石英矿点伟晶岩脉分别采集 3 件样品, 另外采集 1 件尤尼明高纯石英矿床伟晶岩样品, 开展全岩主量元素、微量元素和稀土元素分析, 测试在贵州同微科技有限公司超净实验室内完成, 主量元素采用 X 射线荧光光谱法 (XRF) 测定。稀土和微量元素测试使用电感耦合等离子质谱 (ICP-MS), 测试过程使用 W-2a 及 BHVO-2 两个国际标样, 分析精度和准确度均优于 5%。

选择东秦岭 10 号高纯石英矿点伟晶岩脉进行锆石 U-Pb 同位素分析。锆石分选在南京宏创地质勘查技术服务有限公司所完成, 采用常规粉碎、浮

选和电磁选方法进行分选, 制靶、阴极发光显微照相、透射光及反射光照相工作。锆石 U-Pb 同位素测定在南京宏创地质勘查技术服务有限公司利用 LA-ICP-MS 方法测定, 所用激光剥蚀平台采用 Resolution SE 型 193 nm 深紫外激光剥蚀进样系统 (Applied Spectra), 配备 S155 型双体积样品池。质谱仪采用 Agilent 7900 型电感耦合等离子体质谱仪。采用 5 个激光脉冲对每个剥蚀区域进行预剥蚀 (剥蚀深度约 0.3  $\mu\text{m}$ ), 以去除样品表面可能的污染。在束斑直径 30  $\mu\text{m}$ 、剥蚀频率 5 Hz、能量密度 2  $\text{J}/\text{cm}^2$  的激光条件下分析样品。数据处理采用 Isoplot 程序 (Paton et al., 2010), 锆石 91500 作为校正标样, GJ-1 作为监测标样, 每隔 10~12 个样品点

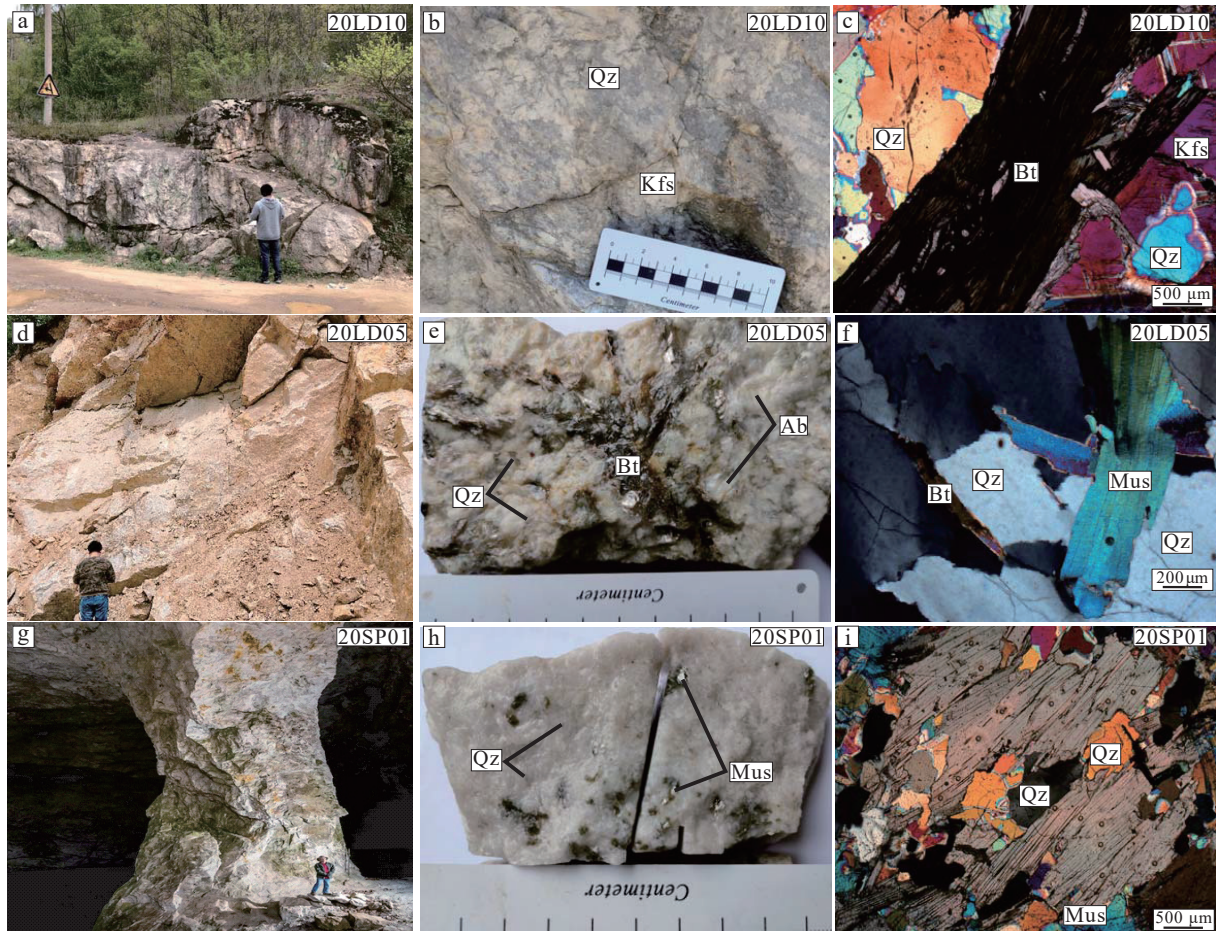


图 3 东秦岭 10 号、5 号高纯石英矿点与 Spruce-Pine 伟晶岩岩相特征

a—10 号花岗伟晶岩脉体宏观特征; b—10 号花岗伟晶岩手标本岩相特征; c—10 号黑云母花岗伟晶岩显微特征; d—5 号云母花岗伟晶岩脉体宏观特征; e—5 号母花岗伟晶岩手标本岩相特征; f—5 号花岗伟晶岩显微特征; g—美国 Spruce-Pine 花岗伟晶岩脉体宏观特征; h—美国 Spruce-Pine 花岗伟晶岩手标本岩相特征; i—美国 Spruce-Pine 花岗伟晶岩显微特征; Qz—石英; Ab—钠长石; Kfs—钾长石; Bt—黑云母; Mus—白云母

Fig.3 Petrographic characteristics of No.10 and No.5 high-purity pegmatite-quartz deposits in the Eastern Qinling and Spruce-Pine pegmatites

a—Macroscopic characteristics of No.10 granite pegmatite dike; b—Lithofacies characteristics of No.10 granite pegmatite hand specimen; c—Microscopic characteristics of No.10 biotite granite pegmatite dike; d—Macroscopic characteristics of No.5 parent granite pegmatite hand specimen; e—Lithofacies characteristics of No.5 mica granite pegmatite hand specimen; f—Microscopic characteristics of No.5 granite pegmatite dike; g—Macroscopical characteristics of Spruce-Pine granite-pegmatite dike; h—Lithofacies characteristics of Spruce-Pine granite-pegmatite hand specimens; i—Microscopical characteristics of Spruce-Pine granite-pegmatite; Qz—Quartz; Ab—Albite; Kfs—K-feldspar; Bt—biotite; Mus—Muscovite

分析 2 个 91500 标样及 1 个 GJ-1 标样。通常采集 20 s 的气体空白, 35~40 s 的信号区间进行数据处理, 按指数方程进行深度分馏校正 (Paton et al., 2010)。以 NIST610 作为外标,  $^{91}\text{Zr}$  作为内标计算微量元素含量。

选择东秦岭 10 号高纯石英矿点伟晶岩脉进行锆石 Lu-Hf 同位素测试。在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成, 采用美国 ASI (Applied Spectra Inc.) J-100 飞秒激光和 Neptune MC-ICP-MS

(Thermo Finnigan) 联用技术, 采用 8 Hz 的激光频率、剥蚀坑尺寸为  $20\ \mu\text{m}\times 40\ \mu\text{m}$ , 能量密度为  $1.5\ \text{J}/\text{cm}^2$ , 剥蚀时间为 31 s。

## 5 测试结果

### 5.1 主量元素

东秦岭 5 号、10 号高纯石英矿点伟晶岩和 Spruce-Pine 高纯石英矿床伟晶岩全岩主微量分析结果见表 1。5 号伟晶岩脉体具有高  $\text{SiO}_2$  (76.56%~

表 1 东秦岭 10 号、5 号伟晶岩脉和 Spruce-Pine 伟晶岩主量元素 (%) 微量元素 ( $10^{-6}$ ) 分析测试结果  
 Table 1 Major (%) and trace ( $10^{-6}$ ) element analyzed result of No.10 and No.5 pegmatite dikes in the Eastern Qinling and Spruce-Pine pegmatites

样品号	LD05-T1	LD05-T2	LD05-T3	LD10-T1	LD10-T2	LD10-T3	20SP01	SP01*	SP02*
SiO <sub>2</sub>	78.13	78.89	76.56	79.37	76.18	77.55	74.39	74.50	77.60
TiO <sub>2</sub>	0.03	0.02	0.03	0.08	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.74	12.22	13.70	11.30	13.08	12.24	14.31	15.60	12.95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.25	0.14	0.31	0.41	0.02	0.05	1.28	0.27	0.15
FeO	0.11	0.07	0.14	0.18	0.01	0.04	0.10	0.10	0.19
MnO	0.03	0.02	0.04	0.01	0.00	0.00	0.10	0.02	0.02
MgO	0.09	0.05	0.08	0.11	0.02	0.05	1.28	0.21	0.19
CaO	0.49	0.48	0.64	0.39	0.36	0.30	5.53	1.54	1.15
Na <sub>2</sub> O	2.87	3.64	3.91	1.85	1.91	1.58	1.79	6.62	4.76
K <sub>2</sub> O	4.21	4.07	3.97	6.24	8.11	7.99	0.01	1.29	2.49
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.14	0.14	0.04	0.04	0.04	0.78	0.06	0.05
总量	99.05	99.74	99.52	99.98	99.77	99.88	99.58	100.23	99.57
$\sigma$	1.4	1.7	1.8	1.8	3.0	2.7	0.1	2.0	1.5
DI	96.0	97.9	96.5	97.8	99.2	99.1	89.5	98.1	98.5
$T_z/^\circ\text{C}$	609	601	648	611	611	554	796	657	526
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	7.08	7.71	7.88	8.09	10.02	9.57	1.80	7.91	7.25
A/CNK	1.25	1.08	1.15	1.08	1.04	1.04	1.10	1.03	1.03
A/NK	1.37	1.18	1.28	1.15	1.10	1.09	4.84	1.27	1.23
AR	2.53	3.69	3.40	1.93	1.79	1.67	1.44	7.79	5.16
FeO <sup>T</sup> /MgO	3.88	4.06	5.45	5.20	1.45	1.72	1.07	1.71	1.69
Mg <sup>#</sup>	59.81	55.36	49.81	52.19	71.27	71.27	95.83	78.92	64.06
Rb	255	223	223	270	213	279	32	26.3	60.7
Ba	4.54	4.85	8.01	403	370	355	320	181	981
Th	0.67	0.17	1.00	8.93	34.5	1.79	12.4	1.58	0.92
U	15.2	7.16	22.7	7.38	11.8	3.36	8.83	1.25	1.48
Nb	4.37	3.67	6.87	2.88	5.79	2.84	16.7	3.75	2.86
Ta	0.95	0.87	1.69	1.08	2.09	1.01	1.32	0.28	0.31
Sr	9.22	6.99	10.7	62.6	60.3	59.3	144	219	313
Zr	10.6	9.20	19.5	10.8	10.9	5.33	181	30.0	3.10
Hf	0.57	0.49	1.04	0.46	0.49	0.25	17.0	1.17	0.20
Y	1.40	0.66	3.00	1.16	3.59	1.84	35.1	5.68	2.80
La	0.89	0.23	1.27	0.91	3.41	0.47	5.54	3.00	1.66
Ce	1.92	0.67	3.14	2.17	6.97	1.34	15.8	6.00	5.77
Pr	0.19	0.05	0.31	0.19	0.76	0.06	1.85	0.68	0.33
Nd	0.58	0.15	0.99	0.69	2.85	0.21	9.00	2.83	1.29
Sm	0.18	0.06	0.36	0.19	0.71	0.07	5.77	0.93	0.43
Eu	0.03	0.01	0.03	0.09	0.26	0.07	0.39	0.42	0.47
Gd	0.16	0.07	0.36	0.17	0.62	0.13	8.20	1.26	0.55
Tb	0.04	0.02	0.09	0.03	0.11	0.03	1.53	0.22	0.09
Dy	0.25	0.11	0.55	0.17	0.59	0.23	7.47	1.25	0.55
Ho	0.04	0.02	0.09	0.03	0.11	0.05	0.94	0.19	0.09
Er	0.13	0.05	0.26	0.10	0.32	0.17	1.78	0.48	0.22
Tm	0.03	0.01	0.05	0.02	0.05	0.03	0.21	0.06	0.03
Yb	0.22	0.08	0.39	0.11	0.31	0.19	1.08	0.33	0.15
Lu	0.03	0.01	0.06	0.02	0.04	0.03	0.13	0.05	0.02
$\Sigma\text{REE}$	4.68	1.55	7.96	4.88	17.1	3.07	59.7	17.7	11.6
$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$	4.23	3.17	3.29	6.65	6.96	2.61	1.80	3.61	5.85
(La/Yb) <sub>N</sub>	2.78	1.88	2.20	5.67	7.37	1.69	3.46	6.13	7.46
(La/Sm) <sub>N</sub>	3.14	2.22	2.21	3.01	3.03	4.27	0.60	2.03	2.43
$\delta\text{Eu}$	0.47	0.56	0.28	1.55	1.16	2.11	0.18	1.19	2.95
$\delta\text{Ce}$	1.08	1.44	1.17	1.20	1.00	1.64	1.18	0.97	1.77

注: \*数据来自张晔, 2010;  $\text{FeO}^{\text{T}} = \text{FeO} + 0.8998 \times \text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 分异指数(DI) =  $Qz + Or + Ab + Ne + Lc + Kp$ ; 碱度率(AR) =  $[\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] / [\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})]$ , 当  $\text{SiO}_2 > 50$ ,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  大于 1 而小于 2.5 时,  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 2\text{Na}_2\text{O}$ ; 里特曼指数( $\sigma$ ) =  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})^2 / (\text{SiO}_2 - 43)$ ;  $\text{Mg}^{\#} = 100 \times \text{Mg}^{2+} / (\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$ 。

78.13%)、富 K<sub>2</sub>O(3.97%~4.21%)、富 Na<sub>2</sub>O(2.87%~3.91%)等特征; 10 号伟晶岩脉体 SiO<sub>2</sub> 含量为 76.18%~79.37%, Na<sub>2</sub>O 含量为 1.58%~1.91%, K<sub>2</sub>O 含量为 6.24%~1.91%, TiO<sub>2</sub> 含量为 0.03%~0.08%; Spruce-Pine 伟晶岩 SiO<sub>2</sub> 含量较高(74.39%~77.60%), Na<sub>2</sub>O 含量范围变化较大(1.79%~6.62%), K<sub>2</sub>O 含量范围变化也较大(0.01%~2.49%)。5 号和 10 号脉体表现相似的元素含量特征, 岩石的硅、钠和钾含量较高, 富碱。对东秦岭 5 号、10 号伟晶岩脉和 Spruce-Pine 伟晶岩、灰池子花岗岩体进行 TAS 图解、A/CNK-A/NK 图解和 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解对比显示: 多数样品在 TAS 图解中落入花岗岩区域(图 4a); 所有样品的 A/CNK 值均大于 1, 表现出过铝质特征(图 4b); 灰池子花岗岩体表现出钙碱性特征, 5 号伟晶岩脉落入高钾钙碱性区域, 10 号伟晶岩脉由于钾含量过高未在图中显示, Spruce-Pine 伟晶岩表现低钾拉斑玄武岩系列—钙碱性系列特征(图 4c)。

### 5.2 微量和稀土元素

东秦岭 5 号、10 号高纯石英矿点伟晶岩和 Spruce-Pine 高纯石英矿床伟晶岩 REE 总量变化较大(1.55×10<sup>-6</sup>~59.69×10<sup>-6</sup>), 在稀土元素球粒陨石标准化配分图中表现出右倾型(图 5a), 呈较为平缓

状。所有样品均表现出轻稀土富集型特征, 东秦岭 5 号、10 号高纯石英矿点伟晶岩 ΣLREE/ΣHREE 值为 2.61~6.96, Spruce-Pine 高纯石英矿床伟晶岩 ΣLREE/ΣHREE 值为 1.80~5.85。5 号高纯石英矿点伟晶岩 δEu(0.28~0.56), 呈现铕亏损型; 10 号高纯石英矿点伟晶岩 δEu(1.16~2.11), 铕呈现弱富集; Spruce-Pine 高纯石英矿床伟晶岩 δEu(0.18~2.95), 铕既有正异常又有负异常, 变化范围较大; 灰池子岩体铕呈现亏损型、平坦型、富集型均有的特征。东秦岭 5 号、10 号高纯石英矿点伟晶岩和 Spruce-Pine 高纯石英矿床伟晶岩 (La/Yb)<sub>N</sub> 比值接近, 范围为 1.69~7.46, 轻重稀土高度分异。东秦岭 5 号、10 号高纯石英矿点伟晶岩 (La/Sm)<sub>N</sub> 比值 2.21~4.27, 均大于 1, 为富集型, 轻稀土分馏较大; Spruce-Pine 高纯石英矿床伟晶岩 (La/Sm)<sub>N</sub> 比值 0.60~2.43; 灰池子岩体 (La/Sm)<sub>N</sub> 比值 3.97~8.11, 为富集型, 轻稀土分馏较大。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 5b), 东秦岭 5 号、10 号高纯石英矿点伟晶岩和 Spruce-Pine 高纯石英矿床伟晶岩、灰池子花岗岩体分布型表现出一定的相似性, 亏损高场强元素 HFSEs(如 Ta、Nb、Ti), 富集大离子亲石元素 LILEs(Rb、K、Th)。

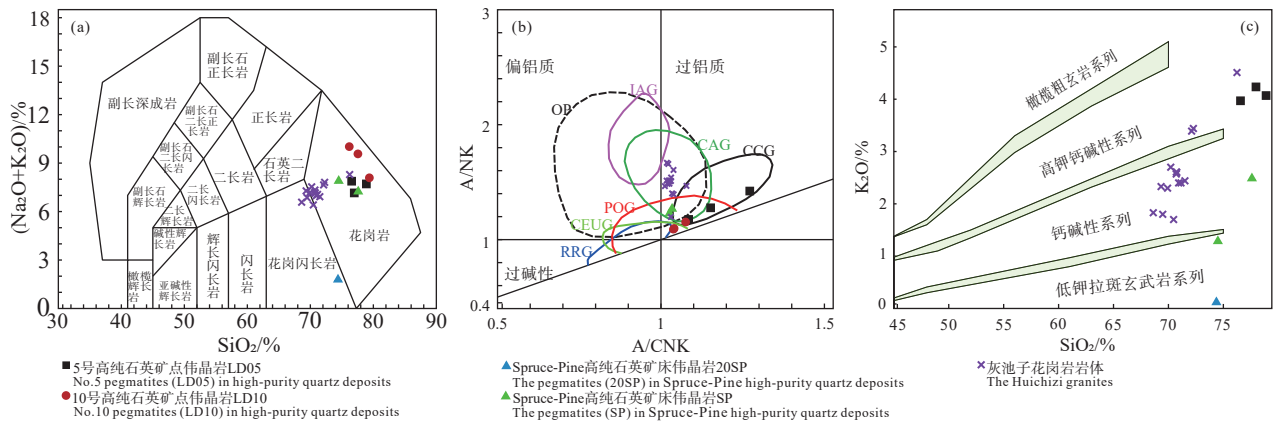


图 4 东秦岭 5 号、10 号伟晶岩脉和 Spruce-Pine 伟晶岩、灰池子花岗岩体 TAS 图解(a, 底图据 Middlemost, 1994)、A/CNK-A/NK 图解(b, 底图据 Maniar and Piccoli, 1989)与 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解(c, 底图据 Peccerillo and Taylor, 1976) (灰池子花岗岩数据据刘丙祥, 2014; Spruce-Pine 部分数据据张晔, 2010)

IAG—岛弧花岗岩类; CAG—大陆弧花岗岩类; CCG—大陆碰撞花岗岩类; POG—后造山花岗岩类; RRG—与裂谷有关的花岗岩类; CEUG—与大陆造陆抬升有关的花岗岩类; OP—大洋斜长花岗岩类

Fig.4 TAS diagram (a, after Middlemost, 1994), A/CNK-A/NK diagram (b, after Maniar and Piccoli, 1989) and SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O diagram (c, after Peccerillo and Taylor, 1976) of No.5 and No.10 pegmatite dikes in the Eastern Qinling, Spruce-Pine pegmatites and the Huichizi granites (the Huichizi granite data from Liu Bingxiang, 2014; some Spruce-Pine data from Zhang Ye, 2010)

IAG—Island arc granites; CAG—Continental arc granites; CCG—Continental collision granites; POG—Post-orogenic granites; RRG—Granites associated with rift valley; CEUG—Granites associated with continental uplift; OP—Oceanic plagiogranites



### 5.3 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素

东秦岭 10 号高纯石英矿点伟晶岩的锆石形态很多,形状基本为长柱状,晶面平整清晰,颗粒粒径为 100~200  $\mu\text{m}$ ,绝大多数锆石内部发育结晶环带(图 6),说明锆石属于岩浆型锆石。从 100 多颗锆石颗粒中挑选出环带结构较为清晰的 20 颗进行测试,20 个点均在锆石边部测定,测试结果见表 2 和图 6。可以看出,13 个有效测试数据获得的年龄相对集中,锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄范围为 405.0~408.6 Ma,获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为(406.8 $\pm$ 0.8)Ma。因此,东秦岭 10 号高纯石英矿点伟晶岩

的成岩年龄为(406.8 $\pm$ 0.8)Ma,形成于早泥盆纪,稍晚于东秦岭 5 号高纯石英矿点伟晶岩(420.2 $\pm$ 2.2)Ma(Zhang et al., 2021),晚于灰池子花岗岩((421 $\pm$ 27)Ma(王涛等, 2009)、(462.8~454.9)Ma(刘丙祥, 2014))和漂池花岗岩体((487.3 $\pm$ 9.6)Ma(刘丙祥, 2014)、(473 $\pm$ 4)Ma(Qin et al., 2014))的形成时代。

东秦岭 10 号高纯石英矿点伟晶岩锆石的 Hf 同位素  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)=3.5\sim 5.6$ , 平均值 4.8(表 3)。此外,东秦岭 10 号高纯石英矿点伟晶岩 Hf 同位素模式年龄  $T_{\text{DM}}=795\sim 897$  Ma, 灰池子岩体 Hf 同位素模式年龄  $T_{\text{DM}}=720\sim 1480$  Ma(Qin et al., 2014)。

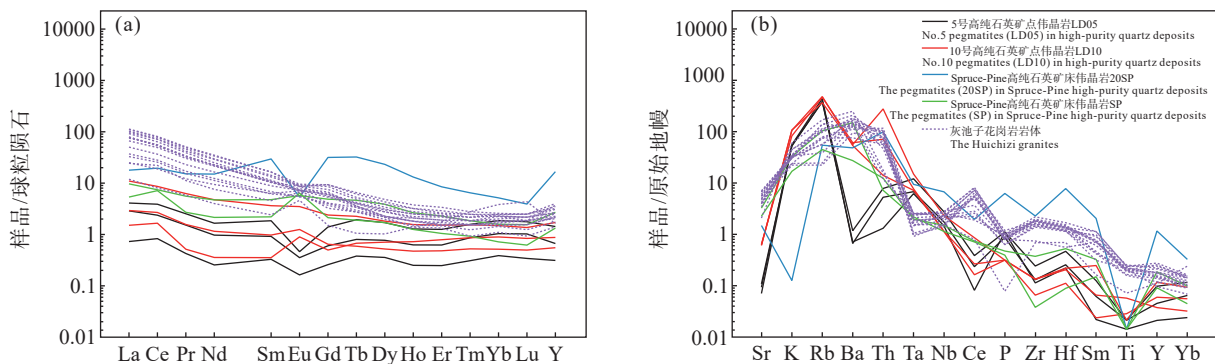


图 5 东秦岭伟晶岩、Spruce-Pine 伟晶岩和灰池子花岗岩体球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)及微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)(球粒陨石标准化值据 Anders 和 Grevesse, 1989; 原始地幔标准化值据 Sun 和 McDonough, 1989; 灰池子花岗岩数据据刘丙祥, 2014; Spruce-Pine 部分数据据张晔, 2010)

Fig.5 The chondrite-normalized REE patterns (a) and the primitive mantle-normalized trace elements spider diagrams (b) of the pegmatites in Eastern Qinling, Spruce-Pine pegmatites and the Huichizi granites (chondrite normalization values after Anders and Grevesse, 1989, primitive mantle normalization values after Sun and McDonough, 1989; The Huichizi granite data from Liu Bingxiang, 2014; Some Spruce-Pine data from Zhang Ye, 2010)

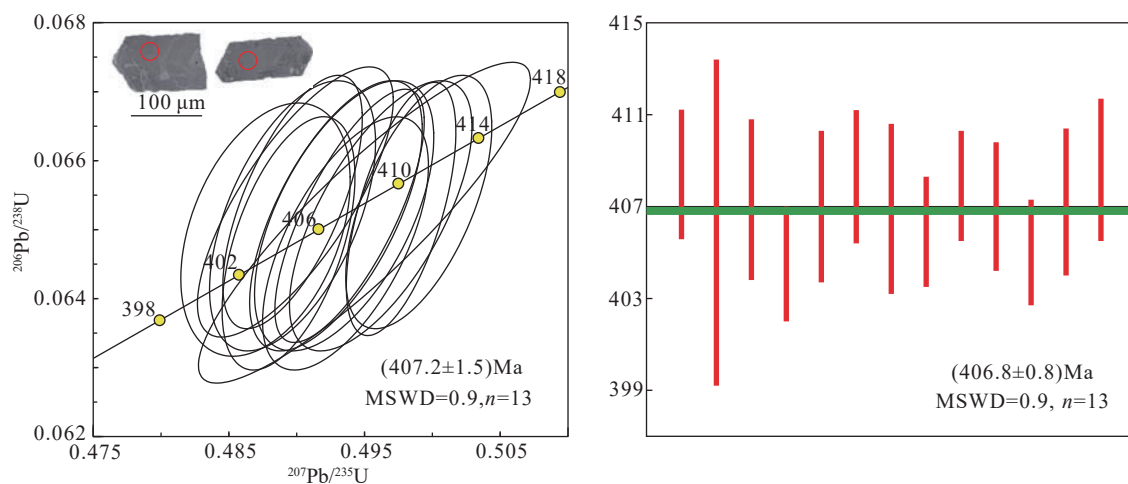


图 6 东秦岭 10 号高纯石英矿点伟晶岩锆石 U-Pb 年龄谐和图及阴极发光图像

Fig.6 Concordia diagram of zircon U-Pb ages and CL images of the pegmatite of No.10 high-purity pegmatite-quartz deposits in the Eastern Qinling

表 2 东秦岭 10 号高纯石英矿点伟晶岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 测试数据

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotopic data of the pegmatite of No.10 high-purity pegmatite-quartz deposits in the Eastern Qinling

测点号	Th/10 <sup>-6</sup>	U/10 <sup>-6</sup>	Th/U	同位素比值						表面年龄/Ma					
				<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ
1	170.7	6168.0	0.03	0.0547	0.0010	0.4897	0.0042	0.0654	0.0015	397.0	43.0	404.6	2.8	408.4	2.8
2	176.5	6030.0	0.03	0.0555	0.0011	0.4950	0.0100	0.0651	0.0019	426.0	45.0	408.0	7.1	406.3	7.1
3	289.9	8420.0	0.03	0.0549	0.0011	0.4935	0.0054	0.0652	0.0016	404.0	45.0	407.2	3.7	407.3	3.5
4	152.7	5740.0	0.03	0.0550	0.0011	0.4936	0.0050	0.0648	0.0015	408.0	44.0	407.2	3.4	404.5	2.5
5	426.0	10830.0	0.04	0.0542	0.0011	0.4897	0.0050	0.0652	0.0016	376.0	45.0	404.6	3.4	407.0	3.3
6	138.4	4655.0	0.03	0.0552	0.0010	0.4990	0.0044	0.0654	0.0015	416.0	42.0	410.9	3.0	408.3	2.9
7	156.8	5709.0	0.03	0.0550	0.0011	0.4962	0.0055	0.0652	0.0016	407.0	44.0	408.9	3.7	406.9	3.7
8	89.1	3428.0	0.03	0.0543	0.0011	0.4877	0.0051	0.0650	0.0015	378.0	46.0	403.6	3.6	405.9	2.4
9	331.6	9680.0	0.03	0.0551	0.0010	0.4977	0.0033	0.0653	0.0015	413.0	42.0	410.1	2.2	407.9	2.4
10	339.4	9070.0	0.04	0.0548	0.0010	0.4939	0.0045	0.0652	0.0015	402.0	42.0	407.4	3.0	407.0	2.8
11	176.8	5898.0	0.03	0.0548	0.0010	0.4894	0.0040	0.0648	0.0015	398.0	43.0	404.4	2.7	405.0	2.3
12	244.0	7240.0	0.03	0.0547	0.0011	0.4929	0.0052	0.0652	0.0016	402.0	41.0	407.4	3.3	407.2	3.2
13	185.6	6150.0	0.03	0.0544	0.0010	0.4899	0.0059	0.0654	0.0016	387.0	43.0	404.7	4.0	408.6	3.1

表 3 东秦岭 10 号高纯石英矿点伟晶岩主锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3 Zircon Hf isotopic data of the pegmatite of No.10 high-purity pegmatite-quartz deposits in the Eastern Qinling

锆石点号	年龄/Ma	<sup>174</sup> Yb/ <sup>177</sup> Hf	<sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf	2σ	<sup>176</sup> Lu/ <sup>177</sup> Hf	2σ	ε <sub>Hf</sub> (t)	T <sub>DM</sub> /Ma	T <sub>DM</sub> <sup>C</sup> /Ma
1	408.4	0.093161	0.282669	0.000014	0.003118	0.000010	4.1	875	1114
2	406.3	0.057485	0.282658	0.000011	0.001817	0.000016	4.1	859	1114
3	407.3	0.083697	0.282650	0.000015	0.002843	0.000007	3.5	897	1152
4	404.5	0.076034	0.282691	0.000014	0.002471	0.000002	5.1	827	1052
5	407.0	0.103616	0.282712	0.000013	0.003486	0.000007	5.5	819	1023
6	408.3	0.055215	0.282692	0.000014	0.001751	0.000009	5.3	810	1039
7	406.9	0.088308	0.282690	0.000013	0.002834	0.000022	4.9	837	1061
8	405.9	0.043717	0.282696	0.000013	0.001388	0.000014	5.6	795	1022
9	407.9	0.098038	0.282668	0.000017	0.003175	0.000009	4.1	877	1116
10	407.0	0.074028	0.282687	0.000014	0.002411	0.000003	5.0	831	1060
11	405.0	0.064612	0.282685	0.000014	0.002093	0.000021	5.0	827	1059
12	407.2	0.078494	0.282704	0.000016	0.002579	0.000006	5.5	811	1026
13	408.6	0.080175	0.282699	0.000016	0.002571	0.000006	5.3	818	1036

## 6 讨论

### 6.1 东秦岭伟晶岩型高纯石英成岩成矿时代

东秦岭地区加里东期侵入岩主要岩性为花岗闪长岩、正长花岗岩、二长花岗岩和花岗伟晶岩等。东秦岭 5 号、10 号高纯石英矿点伟晶岩分布于灰池子岩体边缘外接触带的龙泉坪伟晶岩密集区(图 2), 灰池子花岗岩体形成时代为 463~421 Ma(王涛等, 2009; 刘丙祥, 2014), 龙泉坪伟晶岩密集区北部的漂池花岗岩体形成时代 488~473 Ma(刘丙祥, 2014; Qin et al., 2014), 东秦岭 10 号高纯石英矿点伟晶岩的成岩年龄为(406.8±0.8)Ma, 稍晚于东秦岭 5 号高纯石英矿点伟晶岩(420.2±2.2)Ma(Zhang et al., 2022)。5 号、10 号高纯石英矿点伟晶岩形成时间为晚志留世—早泥盆世, 稍早于美国 Spruce-Pine 的高纯石英花岗伟晶岩形成时代(404~377

Ma, 早泥盆世—晚泥盆世)(Zhang et al., 2022)。

### 6.2 伟晶岩型高纯石英矿床形成的有利温度

在高纯石英选冶提纯过程中, 石英矿物中类质同象杂质是极难去除的, 所以制约高端高纯石英资源突破的关键之一在于寻找低类质同象杂质的石英原料。而天然石英矿物的 Si<sup>4+</sup>常被 Al<sup>3+</sup>、B<sup>3+</sup>、Fe<sup>3+</sup>、Ge<sup>4+</sup>、Ti<sup>4+</sup>和 P<sup>5+</sup>等元素形成晶格替代(Weil, 1984), 这些杂质元素又以 Al、Ti 为主要杂质。石英矿物形成的地质环境和地质作用直接控制了石英矿物杂质元素的分配(Gtze, 2009)。Jourdan et al.(2009)对阿尔卑斯山的脉石英进行研究, 低于 300℃ 的石英具有高 Al 和 Li 等微量元素含量, 而 400℃ 左右的石英则具有相对低的 Al 和 Li 等微量元素含量, Al 元素具有明显的偏向分配于低温石英矿物中。卡林型金矿、浅成低温热液型银矿、斑岩铜矿和 MVT 铅锌矿石英微量元素含量特征对比研究显示,

低于 300℃ 的石英矿物 Al 元素含量高出 400℃ 左右石英矿两个数量级,但是 Ti 元素则在 400℃ 左右石英开始富集到可以计算 Ti 含量地质温度计的水准(Rusk et al., 2011)。还有研究发现石英矿物的结晶温度大于 650℃ 时,石英矿物的 Ti 元素含量  $\geq 31 \times 10^{-6}$ ,随着温度升高 Ti 元素含量快速升高(Wark and Watson, 2006)。对东秦岭 5 号、10 号高纯石英矿点伟晶岩脉和 Spruce-Pine 高纯石英矿床伟晶岩进行全岩 Zr 饱和温度研究显示,东秦岭高纯石英矿点伟晶岩的 Zr 饱和温度为 554~648℃(表 1),与 Spruce-Pine 高纯石英矿床伟晶岩 Zr 饱和温度相近( $T_{Zr}=526\sim 796^\circ\text{C}$ ),均在 600℃ 左右,都低于灰池子花岗岩的 Zr 饱和温度( $T_{Zr}=702\sim 778^\circ\text{C}$ )。

### 6.3 东秦岭伟晶岩型高纯石英成矿地球化学特征

东秦岭 5 号、10 号高纯石英矿点伟晶岩和 Spruce-Pine 高纯石英矿床伟晶岩、灰池子花岗岩体均表现过铝质并非过碱性(图 4b),不同于 A 型花岗岩(Frost et al., 2001; 叶天竺等, 2010),岩石类型均不是奥长花岗岩,岩体内部也未见到基性捕虏体,与 M 型花岗岩定义明显不符(Pitcher, 1997)。东秦岭 10 号高纯石英矿点伟晶岩、Spruce-Pine 高纯石英矿床伟晶岩和灰池子花岗岩体 A/CNK 值均小于 1.1;东秦岭 5 号高纯石英矿点伟晶岩 2 个样品 A/CNK 值一个大于 1.1,另一个小于 1.1;所有样品的  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量较低(0.01%~0.78%),均小于 1。因此,东秦岭 5 号、10 号高纯石英矿点伟晶岩和 Spruce-Pine 高纯石英矿床伟晶岩、灰池子花岗岩体均属于 I 型花岗岩(Chappell, 1999)。

从超基性到酸性岩,分异指数(DI)由小到大有规律地变化,对于某原生岩浆演化形成的岩石,DI 越大,表明岩浆的分异演化越彻底,酸性程度越高,DI 越小,表明分异程度低,基性程度相对高(邱家骥和林景任, 1993)。东秦岭 5 号、10 号高纯石英矿点伟晶岩的分异指数(DI=96~99.2)和 Spruce-Pine 高纯石英矿床伟晶岩分异指数(DI=89.5~98.5)接近,均表现出高分异演化特征。同时,样品中无角闪石,具高的  $\text{SiO}_2$  含量、富碱和  $\text{FeO}^T/\text{MgO}$  比值(1.07~5.2),也表明它们经历了高程度结晶分异(朱弟成等, 2009)。

东秦岭高纯石英矿点伟晶岩和灰池子花岗岩体 Nb/Ta 变化范围较大(2.67~29.62),显示源区物

质来源既有下地壳,也有幔源物质(Petford and Atherton, 1996)。岩石的  $\text{Mg}^\#$  值是判别幔源组分是否参与壳源岩浆成岩的重要指标(Smithies, 2000),如基性下地壳发生部分熔融时,无论熔融程度高或低,形成的岩石  $\text{Mg}^\#$  值均较低( $<40$ ),只有地幔物质参与了成岩,才能导致形成岩石的  $\text{Mg}^\#$  值显著升高 $>40$ (Rapp and Watson, 1995),如当与地幔橄榄岩发生 10% 的混染时,可以促使熔体的  $\text{Mg}^\#$  值从 44 提高到 55(Rapp et al., 1999)。东秦岭 5 号、10 号高纯石英矿点伟晶岩呈现中等偏高的  $\text{Mg}^\#$  值(49.80~71.27),Spruce-Pine 的  $\text{Mg}^\#$  值更高为 64.06~95.83,均显著高于纯地壳物质部分熔融所形成岩石的  $\text{Mg}^\#$  值(张海瑞等, 2019),指示成岩过程中可能有幔源岩浆参与。

### 6.4 东秦岭伟晶岩型高纯石英与灰池子花岗岩体是否存在同源演化

东秦岭伟晶岩型高纯石英矿体以脉体形式展布于灰池子花岗岩体外部,区域上,稀有金属伟晶岩、高纯石英伟晶岩、含铀伟晶岩及不成矿伟晶岩也围绕花岗岩产出,并表现出一定的水平结构分带。一些学者根据伟晶岩和灰池子花岗岩具有密切空间关系和相似地球化学组成,认为东秦岭高纯石英矿点伟晶岩与灰池子花岗岩体是同源演化的(卢欣祥等, 2010; 秦克章等, 2019),也有一些学者认为区域伟晶岩与灰池子花岗岩时代相差较大、地化特征存在不同,二者并没有直接成因联系(王江波等, 2020; Yuan et al., 2022; Qin et al., 2022)。

通过梳理近年来东秦岭地区伟晶岩和灰池子花岗岩年龄(表 4),可以发现花岗岩和伟晶岩的年龄具有连续性,灰池子花岗岩最小谐和年龄为 420 Ma,龙泉坪伟晶岩最大谐和年龄为 429 Ma,灰池子花岗岩体侵位时代早于伟晶岩脉体。东秦岭 5 号高纯石英矿点(420.2 Ma)与灰池子岩体晚期黑云母二长花岗岩(421 Ma)一致,但明显晚于灰池子早期花岗岩年龄,东秦岭 10 号高纯石英矿点(406.8 Ma)明显晚于灰池子花岗岩年龄。同时,东秦岭 5 号、10 号高纯石英矿点伟晶岩与灰池子花岗岩体矿物组成相似,空间关系密切;东秦岭 5 号、10 号高纯石英矿点伟晶岩和灰池子花岗岩体具有相似的球粒陨石标准化稀土元素配分图和原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 5);在哈克图解中(图 7),东秦岭

表 4 东秦岭地区伟晶岩及灰池子花岗岩体年龄一览

Table 4 Age of the pegmatites and the Huizhi granitic pluton in the Eastern Qinling

采样位置	样品岩性	年代学方法	年龄/Ma	谐和年龄区间/Ma	数据来源
陕西光石沟	花岗伟晶岩	LA-ICP-MS独居石U-Th-Pb	399.6±0.8		武勇等, 2022
陕西光石沟	花岗伟晶岩	LA-ICP-MS独居石U-Th-Pb	400.2±4.3		武勇等, 2022
陕西光石沟	花岗伟晶岩	LA-ICP-MS独居石U-Th-Pb	400.8±2.4		武勇等, 2022
陕西光石沟	花岗伟晶岩	LA-ICP-MS独居石U-Th-Pb	403.5±3.6		武勇等, 2022
陈家庄屋沟村	含铀伟晶岩	LA-ICP-MS锆石U-Pb	404.3±1.4	395.1~409.4	王江波等, 2020
南阳山	稀有金属伟晶岩	LA-ICP-MS锆石U-Pb	406.2±5.2		Yuan et al., 2022
龙泉坪	花岗伟晶岩	LA-ICP-MS锆石U-Pb	406.8±0.8	404.5~408.6	本文
南阳山	稀有金属伟晶岩	LA-ICP-MS铀铁矿物U-Pb	406.8±3.3		Yuan et al., 2022
南阳山	稀有金属伟晶岩	LA-MC-ICP-MS锡石U-Pb	410.6±7.9		Yuan et al., 2022
陕西光石沟	黑云母花岗伟晶岩	LA-ICP-MS锆石U-Pb	413.6±2.4		袁峰等, 2017
陕西陈家庄	花岗伟晶岩	LA-ICP-MS锆石U-Pb	414±4		张帅等, 2019
陕西光石沟	黑云母花岗伟晶岩	LA-ICP-MS锆石U-Pb	415.1±2.6		袁峰等, 2017
陕西陈家庄	花岗伟晶岩	LA-ICP-MS锆石U-Pb	416±3		张帅等, 2019
陕西陈家庄	花岗伟晶岩	LA-ICP-MS锆石U-Pb	417±3		张帅等, 2019
龙泉坪	花岗伟晶岩	LA-ICP-MS独居石U-Pb	420.2±2.2	415~429	Zhang et al., 2022
南阳山	锂辉石钠长石伟晶岩	LA-MC-ICP-MS锡石U-Pb	420±2		曾威等, 2021
灰池子	黑云母二长花岗岩	LA-ICP-MS锆石U-Pb	421±27		王涛等, 2009
灰池子	黑云母二长花岗岩	SIMS锆石U-Pb	434±7		王涛等, 2009
灰池子	花岗岩	LA-ICP-MS锆石U-Pb	454.9±7.7	431~480	刘丙祥, 2014
灰池子	花岗岩	LA-ICP-MS锆石U-Pb	457±13	420~486	刘丙祥, 2014
灰池子	花岗岩	LA-ICP-MS锆石U-Pb	460±3.9	440~473	刘丙祥, 2014
灰池子	花岗岩	LA-ICP-MS锆石U-Pb	462.8±6.0	446~485	刘丙祥, 2014

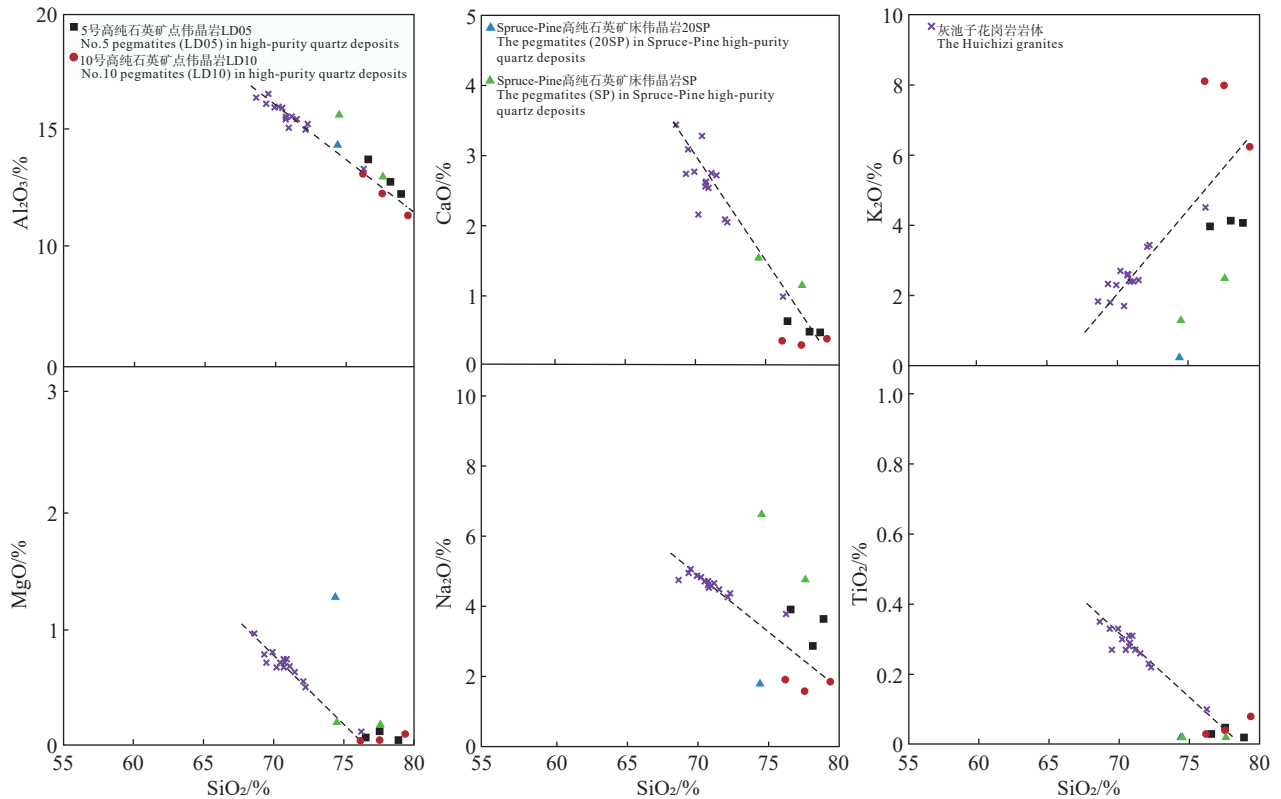


图 7 东秦岭 5 号、10 号伟晶岩脉和 Spruce-Pine 伟晶岩、灰池子花岗岩体哈克图解

Fig.7 Harker diagrams of No.5 and No.10 pegmatite dikes in the Eastern Qinling, Spruce-Pine pegmatites and the Huichizi granites

5号、10号高纯石英矿点伟晶岩和灰池子花岗岩体所有样品表现出良好的线性趋势,指示了从花岗岩到伟晶岩结晶分异程度逐渐增高的趋势;东秦岭10号高纯石英矿点伟晶岩的锆石 Hf 同位素  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)=3.5\sim 5.6$ ,与灰池子花岗岩的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)=4.9\sim 10.7$  多数值相近;此外,东秦岭10号高纯石英矿点伟晶岩的锆石的 Hf 同位素模式年龄  $T_{\text{DM}}=795\sim 897$  Ma,与灰池子岩体  $T_{\text{DM}}=720\sim 1480$  Ma 多数值接近。综上所述可以看出:东秦岭5号高纯石英矿点伟晶岩与灰池子岩体晚期黑云母二长花岗岩空间关系密切、形成时代相近、地球化学特征相似,但东秦岭10号高纯石英矿点伟晶岩虽与灰池子岩体同样具有密切的空间关系和相似的岩石地球化学特征,然而二者形成时代跨度较大( $>14$  Ma),不可能是同源演化形成的产物。

由于花岗质岩浆在成岩过程中,不仅受源区特征影响,部分熔融程度、压力、温度、挥发分和岩浆混合作用、结晶分离等都会对成岩过程和结果产生影响,对于东秦岭高纯石英矿点伟晶岩和灰池子花岗岩体是否存在同源演化仅通过年龄和岩石地球化学对比是不能完全反演二者形成的时空耦合关系。因此,对于东秦岭高纯石英矿点伟晶岩和灰池子花岗岩体是否存在同源演化仍需要进一步研究。

## 7 结 论

(1)东秦岭10号高纯石英矿形成于早泥盆世,锆石 U-Pb 年龄为  $(406.8\pm 0.8)$  Ma,东秦岭高纯石英矿形成时代为晚志留世—早泥盆世,稍早于美国 Spruce-Pine 的高纯石英花岗伟晶岩形成时代。

(2)东秦岭高纯石英矿点伟晶岩与美国 Spruce-Pine 高纯石英矿床伟晶岩形成温度均  $600^{\circ}\text{C}$  左右。

(3)东秦岭5号、10号高纯石英矿点伟晶岩和 Spruce-Pine 高纯石英矿床伟晶岩均属于经历了高程度结晶分异的 I 型花岗岩,源区物质来源既有下地壳,也有幔源物质。

(4)仅通过对东秦岭高纯石英矿点伟晶岩和灰池子花岗岩体空间关系、形成时代和岩石地球化学特征,是不足以完全反演源区特征及成岩成矿过程,对于东秦岭高纯石英矿点伟晶岩和灰池子花岗岩体是否存在同源演化仍需要进一步研究。

## References

- Anders E, Grevesse N. 1989. Abundances of the elements: Meteoritic and solar[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(1): 197–214.
- Cai Wenchun, Wang Tianyi, Gao Feng, Zhang Xiaoming, Wang Xueping. 2023. New discovery of Pegmatite type Be-Li-Sn-Ta deposit in the Luonan-Danfeng area, Shaanxi Province, Eastern Qinling Mountains[J]. *Geology in China*, 50(6): 1923–1924 (in Chinese).
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46: 535–551.
- Chen Xijing, Wang Shurong, Zhang Xiuying. 1993. Basic Characteristics or Mineralization of Qinling Granite Pegmatite[M]. Beijing: Geological Publishing House, 8–70 (in Chinese).
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, Arculus R J, Ellis D J, Frost C D. 2001. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033–2048.
- Gtze J. 2009. Chemistry, textures and physical properties of quartz—geological interpretation and technical application[J]. *Mineralogical Magazine*, 73(4): 645–671.
- Gu Zhen'an, Tong Jifeng, Cui Yuansheng, Peng Shou, Su Guijun, Zhou Hongjin, Feng Huimin, Zhao Fei, Tian Guiping, Meng Qingjie, Hong Wei. 2019. Strategic research on nonmetallic mineral resources for building materials in China[J]. *Engineering Science*, 21(1): 104–112 (in Chinese with English abstract).
- Jourdan A L, Vennemann T W, Mullis J, Ramseyer K, Spiers C J. 2009. Evidence of growth and sector zoning in hydrothermal quartz from Alpine veins[J]. *European Journal of Mineralogy*, 21(1): 219–231.
- Li Jiankang, Li Peng, Yan Qinggao, Liu Qiang, Xiong Xin. 2021. History of granitic pegmatite research in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 2996–3016 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bingxiang. 2014. Magmatism and Crustal Evolution in the Eastern Section of the North Qinling Terrane[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 1–260 (in Chinese).
- Lu Xinxiang, Zhu Chaohui, Gu Demin, Zhang Huamian, Wu Mei, Wu Yan. 2010. The main geological and metallogenic characteristics of granitic pegmatite in Eastern Qinling belt[J]. *Geological Review*, 56(1): 21–30 (in Chinese with English abstract).
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643.
- Middlemost E A. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth—Science Reviews*, 37(3/4): 215–224.
- Paton C, Woodhead J D, Hellstrom J C, Hergt J M, Greig A, Maas R. 2010. Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(3): Q0AA06.
- Peccerillo A, Taylor S. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J].

- Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81.
- Pei Xiaoli. 2017. Magmatism in the Paleozoic of the North Qinling Mountains: Taking the Rich Water Complex and Qinling Pegmatite as Examples[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 1–50 (in Chinese with English abstract).
- Pefford N, Atherton M. 1996. Na rich partial melts from newly underplated basaltic crust: The Cordillera Blanca Batholith, Peru[J]. *Journal of Petrology*, 37(6): 1491–1521.
- Pitcher W S. 1997. The Nature and Origin of Granite[M]. Springer Science & Business Media, 1–377.
- Qin Kezhang, Zhou Qifeng, Tang Dongmei, Wang Chunlong. 2019. Types, internal structural patterns, mineralization and prospects of rare element pegmatites in East Qinling Mountain in comparison with features of Chinese Altay[J]. *Mineral Deposits*, 38(5): 970–982 (in Chinese with English abstract).
- Qin Z W, Wu Y B, Wang H, Gao S, Zhu L Q, Zhou L, Yang S H. 2014. Geochronology, geochemistry, and isotope compositions of Piaoichi S-type granitic intrusion in the Qinling orogen, central China: Petrogenesis and tectonic significance[J]. *Lithos*, 202/203: 347–362.
- Qin Z W, Wu Y B, Siebel W, Wang H, Fu J M, Lu Y Y, Shan L, Yu Y S. 2022. Source nature and magma evolution of I-type granites from the North Qinling orogen, China, revealed by zircon morphology and grain-scale variations in Hf–O isotope composition[J]. *Lithos*, 428: 106819.
- Qiu Jiaji, Lin Jingqian. 1993. Petrochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 67 (in Chinese).
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust–mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 36(4): 891–931.
- Rapp R, Shimizu N, Norman M, Applegate G. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa[J]. *Chemical Geology*, 160(4): 335–356.
- Rusk B, Koenig A, Lowers H. 2011. Visualizing trace element distribution in quartz using cathodoluminescence, electron microprobe, and laser ablation–inductively coupled plasma–mass spectrometry[J]. *American Mineralogist*, 96(5/6): 703–708.
- Smithies R. 2000. The Archaean tonalite–trondhjemite–granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 182(1): 115–125.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345.
- Wang Jiangbo, Hou Xiaohua, Li Wanhua, Zhang Liang, Zhao Youdong, Chen Hongbin, Li Weihong. 2020. Metallogenic characteristics and metallogenic model of the pegmatite type uranium deposit in Danfeng area, Eastern Qinling Mountains[J]. *Earth Science*, 45(1): 61–71 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Wang Xiaoxia, Tian Wei, Zhang Jianli, Li Wuping, Li San. 2009. North Qinling Paleozoic granite associations and their variation in space and time: Implications for orogenic processes in the orogens of central China[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 39(7): 949–971 (in Chinese with English abstract).
- Wark D A, Watson E B. 2006. Titanite: A titanium–in–quartz geothermometer[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(6): 743–754.
- Weil J A. 1984. A review of electron spin spectroscopy and its application to the study of paramagnetic defects in crystalline quartz[J]. *Physics & Chemistry of Minerals*, 10(4): 149–165.
- Wu Yong, Qin Mingkuan, Guo Dongfa, Cui Jianyong, Liu Hanbin, He Sheng. 2022. Metallogenic age of the Guangshigou pegmatite type uranium deposit, North Qinling: Constraints from U–Th–Pb dating of monazite[J]. *Uranium Geology*, 4: 698–706 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wenbo, Zhou Hai, Song Gongshe, Wu Peng, Wang Qiang. 2019. A preliminary study on the metallogenic regularity of rare metal mineral resources of granitic pegmatite type in Shangdan area, Shaanxi Province[J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 71(1): 64–71 (in Chinese with English abstract).
- Ye Tianzhu, Zhang Zhiyong, Xiao Qinghui, Pan Guitang, Feng Yanfang. 2010. Technical Requirements for Research on Metallogenic Geological Background[M]. Beijing: Geological Publishing House, 180–185 (in Chinese).
- Yuan F, Jiang S Y, Wang C L, Jin G, Zhang J, Zhang H X, Hu X J. 2022. U–Pb geochronology of columbite–group mineral, cassiterite, and zircon and Hf isotopes for Devonian rare–metal pegmatite in the Nanyangshan deposit, North Qinling Orogenic Belt, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 140: 104634
- Zeng Wei, Zhou Hongying, Sun Fengyue, Wang Jiaying, Bi Junhui, Cui Yurong, Chen Junqiang. 2021. Cassiterite U–Pb age of rare metal pegmatites in Guanpo area North Qinling, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(12): 2179–2182. (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengli, Liu Liang, Wang Tao, Wang Xiaoxia, Li Lei, Gong Qifu, Li Xiaofei. 2013. Granitic magmatism related to Early Paleozoic continental collision in the North Qinling belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(23): 2323–2329 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Meng Qingren, Yu Zaoping, Sun Yong, Zhou Dingwu, Guo Anlin. 1996. The orogenic process and dynamic characteristics of the Qinling orogenic belt[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, (3): 193–200 (in Chinese).
- Zhang Haiqi, Zhu Likuan, Zhao Haibo, Liu Lei, Guo Feng, Liu Guangxue, Yi Yuejun, Zhang Hongli. 2022. First discovery of the Longquanping pegmatitic high–purity quartz deposit in the area of Lushi, Henan: Implications for exploration[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 42(4): 153–158 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hairui, Zhao Jiaolong, Yu Huiyang. 2019. Petrogenesis and tectonic implications of the Laohushan quartz diorite from the

- eastern part of North Qilian orogen, NW China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 25(5): 641–653 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kexin, Pan Guitang, He Weihong, Xiao Qinghui, Xu Yadong, Zhang Zhiyong, Lu Songnian, Deng Jinfu, Feng Yimin, Li Jinyi, Zhao Xiaoming, Xing Guangfu, Wang Yonghe, Yin Fuguang, Hao Guojie, Zhang Changjie, Zhang Jin, Gong Yiming. 2015. New scheme for stratigraphic division of China's tectonics[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 40(2): 206–233 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuai, Liu Jiajun, Yuan Feng, Liu Gang, Wang Gongwen, Zhang Hongyuan, Zhang Hongyu. 2019. Zircon U–Pb geochronology and geochemistry of granites and pegmatites, and metallogenesis of related uranium from the Chenjiazhuang deposit, Shaanxi Province[J]. *Earth Science Frontiers*, 26(5): 270–289 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y, Zhao H B, Liu L, Pan J Y, Zhu L K, Liu G Q, Zhan X T. 2021. Timing of granite pegmatite–type high–purity quartz deposit in the Eastern Qinling, China: Constraints from in–situ LA–ICP–MS trace analyses of quartz and monazite U–Pb dating[J]. *Acta Geochimica*, 41(2): 197–207.
- Zhang Ye. 2010. *Geology, Geochemical Characteristics, and High Purity Quartz Metallogenic Prospects of Spruce Pine in the United States and Altay Pegmatite in Xinjiang*[D]. Nanjing: Nanjing University, 1–56 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Decheng, Mo Xuanxue, Wang Liquan, Zhao Zhidan, Niu Yaoling, Zhou Changyong, Yang Yueheng. 2009. Petrogenesis of highly fractionated I–type granites in the Chayu area of eastern Gangdese, Tibet: Constraints from zircon U–Pb geochronology, geochemistry and Sr–Nd–Hf isotopes[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 39(7): 833–848 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 蔡文春, 王天毅, 高峰, 张小明, 王学平. 2023. 东秦岭陕西洛南—丹凤地区新发现伟晶岩型锂铍锡钽矿点[J]. *中国地质*, 50(6): 1923–1924.
- 陈西京, 王淑荣, 张秀颖. 1993. 秦岭花岗伟晶岩基本特征或成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 8–70.
- 顾真安, 同继锋, 崔源声, 彭寿, 苏桂军, 周洪锦, 冯惠敏, 赵飞, 田桂萍, 孟庆洁, 洪伟. 2019. 建材非金属矿产资源强国战略研究[J]. *中国工程科学*, 21(1): 104–112.
- 李建康, 李鹏, 严清高, 刘强, 熊欣. 2021. 中国花岗伟晶岩的研究历程及发展态势[J]. *地质学报*, 95(10): 2996–3016.
- 刘丙祥. 2014. 北秦岭地体东段岩浆作用与地壳演化[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 1–260.
- 卢欣祥, 祝朝辉, 谷德敏, 张画眠, 吴梅, 吴艳. 2010. 东秦岭花岗伟晶岩的基本地质矿化特征[J]. *地质论评*, 56(1): 21–30.
- 裴小利. 2017. 北秦岭古生代的岩浆作用——以富水杂岩及秦岭伟晶岩为例[D]. 桂林: 桂林理工大学, 1–50.
- 秦克章, 周起凤, 唐冬梅, 王春龙. 2019. 东秦岭稀有金属伟晶岩的类型、内部结构、矿化及远景——兼与阿尔泰地区对比[J]. *矿床地质*, 38(5): 970–982.
- 邱家骥, 林景任. 1993. 岩石化学[M]. 北京: 地质出版社, 67.
- 王江波, 侯晓华, 李万华, 张良, 赵友东, 陈宏斌, 李卫红. 2020. 东秦岭丹凤地区伟晶岩型铀矿矿化特征与成矿模式[J]. *地球科学*, 45(1): 61–71.
- 王涛, 王晓霞, 田伟, 张成立, 李伍平, 李舫. 2009. 北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的启示[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 39(7): 949–971.
- 武勇, 秦明宽, 郭冬发, 崔建勇, 刘汉彬, 何升. 2022. 北秦岭光石沟花岗伟晶岩型铀矿床成矿时代: 来自独居石原位微区 U–Th–Pb 定年约束[J]. *铀矿地质*, 4: 698–706.
- 杨文博, 周海, 宋公社, 吴鹏, 王强. 2019. 陕西商丹地区花岗岩伟晶岩型稀有金属矿产成矿规律初探[J]. *有色金属(矿山部分)*, 71(1): 64–71.
- 叶天竺, 张智勇, 肖庆辉, 潘桂棠, 冯艳芳. 2010. 成矿地质背景研究技术要求[M]. 北京: 地质出版社, 180–185.
- 袁峰, 刘家军, 吕古贤, 沙亚洲, 张帅, 翟德高, 王功文, 张宏远, 刘刚, 杨尚松, 王菊婵, 仁玉瑞. 2017. 北秦岭光石沟铀矿区花岗岩、伟晶岩锆石 U–Pb 年代学、地球化学及成因意义[J]. *地学前缘*, 24(6): 25–45.
- 曾威, 周红英, 孙丰月, 王佳营, 毕君辉, 崔玉荣, 陈军强. 2021. 北秦岭官坡地区稀有金属伟晶岩锡石 U–Pb 年龄[J]. *地质通报*, 40(12): 2179–2182.
- 张成立, 刘良, 王涛, 王晓霞, 李雷, 龚齐福, 李小菲. 2013. 北秦岭早古生代大陆碰撞过程中的花岗岩浆作用[J]. *科学通报*, 58(23): 2323–2329.
- 张国伟, 孟庆任, 于在平, 孙勇, 周鼎武, 郭安林. 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, (3): 193–200.
- 张海啟, 朱黎宽, 赵海波, 刘磊, 郭峰, 刘广学, 伊跃军, 张宏丽. 2022. 河南卢氏龙泉坪伟晶岩型高纯石英矿床的首次发现及找矿意义[J]. *矿产保护与利用*, 42(4): 153–158.
- 张海瑞, 赵蛟龙, 于汇洋. 2019. 北祁连造山带东段老虎山石英闪长岩成因及其地质意义[J]. *高校地质学报*, 25(5): 641–653.
- 张克信, 潘桂棠, 何卫红, 肖庆辉, 徐亚东, 张智勇, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 李锦轶, 赵小明, 邢光福, 王永和, 尹福光, 郝国杰, 张长捷, 张进, 龚一鸣. 2015. 中国构造–地层大区划分新方案[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 40(2): 206–233.
- 张帅, 刘家军, 袁峰, 刘刚, 王功文, 张宏远, 张红雨. 2019. 陕西商丹陈家庄铀矿区花岗岩体和伟晶岩脉的 U–Pb 年龄、地球化学特征与铀成矿作用[J]. *地学前缘*, 26(5): 270–289.
- 张晔. 2010. 美国 Spruce Pine 和新疆阿尔泰伟晶岩地质–地球化学特征和高纯石英成矿前景[D]. 南京: 南京大学, 1–56.
- 朱弟成, 莫宣学, 王立全, 赵志丹, 牛耀麟, 周长勇, 杨岳衡. 2009. 西藏冈底斯东部察隅高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U–Pb 年代学、地球化学和 Sr–Nd–Hf 同位素约束[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 39(7): 833–848.