

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

张海啟^{1,2,3}, 朱黎寬^{1,2,3}, 赵海波^{1,2,3}, 刘磊^{1,2,3}, 郭峰^{1,2,3}, 刘广学^{1,2,3}, 伊跃军^{1,2,3}, 张宏丽^{1,2,3}

1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006;
2. 国家非金属矿资源综合利用工程技术研究中心, 河南 郑州 450006;
3. 自然资源部高纯石英开发利用工程技术创新中心, 河南 郑州 450006

中图分类号: P578.4⁺94; P619.23⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2022)04-0153-06
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.04.018

摘要 河南卢氏龙泉坪伟晶岩型高纯石英矿床位于北秦岭构造带东部。矿床赋存于秦岭岩群石槽沟组和峡河岩群寨根组中, 矿石类型为白云母花岗伟晶岩型, 其主要矿物成分为钠长石(31%~51%)、微斜长石(11%~20%)、石英(25%~38%)和白云母(7%~9%), 含少量石榴子石(1%~2%)、黑云母(<1%)等; 石英矿物经深度提纯 SiO₂ 含量可达 99.997%。与美国 Spruce Pine 伟晶岩型高纯石英矿床对比, 两者具有相似的成矿地质背景和地球化学特征。通过系统的调查分析, 本研究认为北秦岭和阿尔泰地区具有寻找伟晶岩型高纯石英矿床的潜力; 不含稀有金属矿化、流体包裹体含量低的伟晶岩是寻找高纯石英矿床的理想目标地质体。龙泉坪伟晶岩型高纯石英矿床的发现对我国高纯石英资源地质勘查具有重要的示范和引领作用。

关键词 高纯石英; 伟晶岩; 龙泉坪; 北秦岭

引言

高纯石英是光伏能源、集成电路、信息通信、人工智能等战略性新兴产业不可或缺的关键性基础材料, 是世界稀缺、我国短缺的战略性资源, 在国家资源安全保障方面具有重要地位^[1-3]。

高纯石英原料的来源主要分为水晶、脉石英和花岗伟晶岩三种。水晶矿床一般规模较小, 目前主要用作工艺品原料; 脉石英矿床一般规模不大, 仅部分可做高纯石英原料; 伟晶岩型高纯石英具有规模大、品质高的特点, 其中以北卡罗来纳州 Spruce Pine 伟晶岩矿床最为典型, 美国矽比科(Sibelco)公司利用该矿床伟晶岩生产的 IOTA 系列高纯石英砂产品, 几乎垄断了国际市场上高端石英砂产品^[4]。伟晶岩型高纯石英是将来高纯石英相关勘查和研究的重要对象。

北秦岭地区出露花岗伟晶岩脉群(6 913 条, 平均密度约 8.6 条/km²), 前人在该地区的研究主要集中在与伟晶岩有关的铌、钽、锂、铀等矿床(化)^[5-7], 对高纯石英资源的有关方向的研究较少。

近年来我们开展了北秦岭卢氏、商南、丹凤等地区伟晶岩型高纯石英资源找矿研究, 在卢氏地区发现多处伟晶岩型高纯石英资源, 找矿潜力巨大。本次研究可为我国伟晶岩型高纯石英资源的调查评价提供借鉴。

1 地质背景

研究区位于北秦岭构造带东部, 该构造带南以商丹缝合带为界, 北以洛南—栾川断裂带为界^[8]。地层主要由宽坪岩群、二郎坪岩群、秦岭岩群、峡河岩群和丹凤群组成^[9](图 1)。区内发育早古生代花岗岩和深熔脉岩, 包括侵入秦岭岩群中的漂池岩体(496.1 ± 4.2

收稿日期: 2022-08-09

基金项目: 中国地质调查项目(DD20221698)

作者简介: 张海啟(1967—), 男, 山东费县人, 博士, 正高级工程师, 主要从事基础地质调查和矿产资源综合利用研究。E-mail: zhaiqi@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 朱黎寬(1984—), 男, 河南南阳人, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿产地质调查和矿床学研究。E-mail: zhulikuan@163.com。

Ma)、灰池子岩体(445.6 ± 6.1 Ma)等^[8]。已发现花岗伟晶岩6 000余条,形成商南、栾庄、官坡、龙泉坪4个花岗伟晶岩岩密集区。秦岭岩群中发现多个变质年龄为500 Ma的高压—超高压岩块。

北秦岭地区已发现伟晶岩型稀有金属矿床(点)4

处,分别为南阳山、七里沟、蔡家沟和白庙沟稀有金属矿,大多为含铌、钽、锂、铍的矿床,同时分布多个伟晶岩型铀矿化点和铀矿床,如陈家庄、光石沟铀矿。该地区是我国重要的伟晶岩型稀有金属矿和硬岩型铀矿成矿远景区。

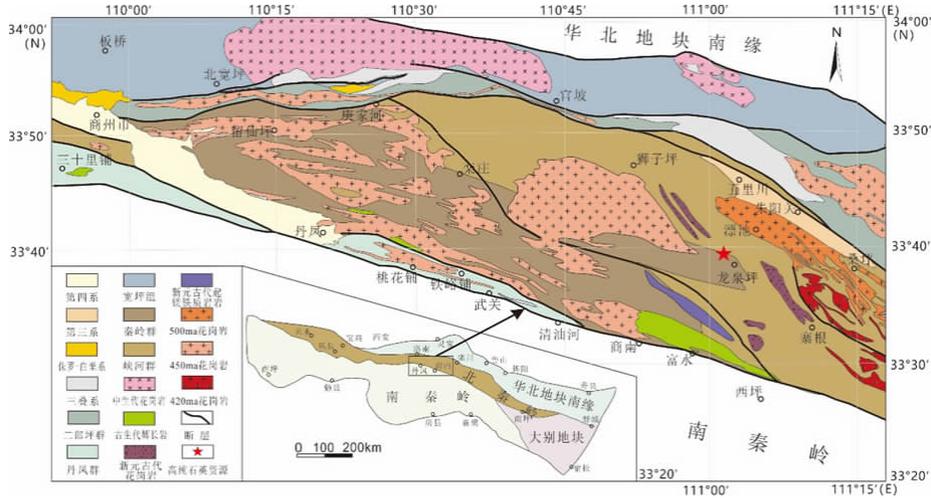


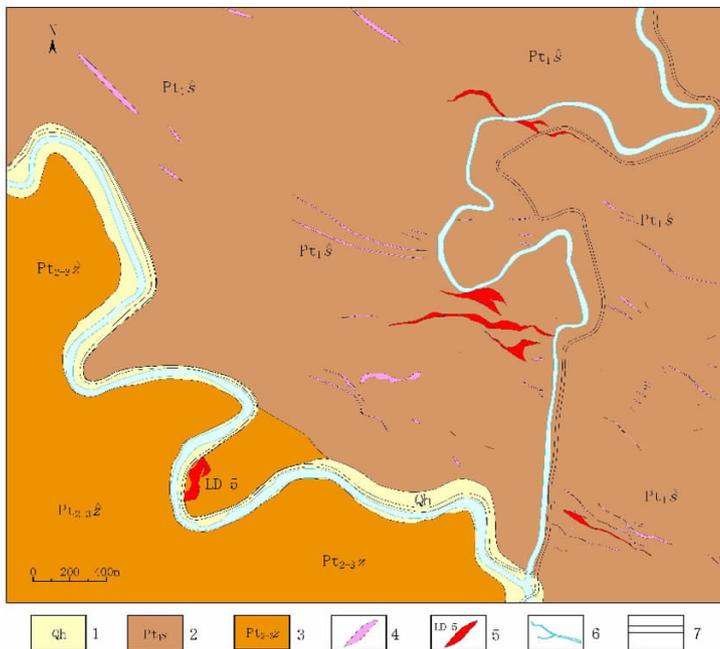
图1 北秦岭地区地质简图(据张成立等,2013,修改)

Fig. 1 Geological map of the North Qinling region (modified after Zhang et al. , 2013)

2 矿床特征

龙泉坪伟晶岩型高纯石英矿床位于灰池子岩体东

南(图1)。矿区地层主要为古元古代秦岭岩群石槽沟组、中—新元古代峡河岩群寨根组 and 第四系。石槽沟组岩性主要为黑云斜长片麻岩、黑云二长片麻岩、二云



1—第四系;2—秦岭岩群石槽沟组;3—峡河岩群寨根组;4—伟晶岩脉;5—矿体;6—河流;7—道路

图2 河南卢氏龙泉坪伟晶岩型高纯石英矿区地质图

Fig. 2 Geological map of pegmatite - type high - purity quartz mine area in Longquanping, Henan

斜长片麻岩、斜长角闪片麻岩和大理岩;寨根组岩性主要为石榴二云石英片岩、黑云石英片岩、斜长角闪岩;第四系主要分布于河谷两侧及边坡地带,由冲洪积砂、黄土、腐殖土等组成(图2)。

区内断裂多为毛河断裂的次级断裂,规模较小,一般倾向北东,以脆性断裂为主;发育规模较小的为褶皱构造。

矿区内无岩体出露,矿区外围北西约7 km处出露灰池子岩体(445.6 ± 6.1 Ma),主要岩性为黑云母二长花岗岩($\eta\gamma\beta_3$)和黑云母花岗闪长岩($\gamma\delta\beta_3$)。该岩体与矿体关系密切。

通过地质填图、勘查工程和分析测试,初步圈定6条伟晶岩型高纯石英矿体。其中LD-5号矿体规模最大,位于矿区西南,长255 m,宽10~33 m,总体走向近南北,倾向283°,倾角43°~52°。矿石类型为白云母花岗伟晶岩型,矿石呈淡绿~灰白色,伟晶结构、文象结构,分带不明显。主要矿物成分为钠长石(31%~51%)、微斜长石(11%~20%)、石英(25%~38%)和白云母(7%~9%),含少量石榴子石、黑云母、磷灰石、针铁矿等。经深度提纯石英SiO₂含量达到99.995%,部分样品纯度达到99.997%。

3 伟晶岩型高纯石英矿床的发现过程

2019年至今,依托于自然资源部中国地质调查局地质调查二级项目,中国地质科学院郑州矿产综合利用所持续开展了高纯石英资源调查研究。

2019年,通过江西宜春地区花岗岩资源的综合利用评价,认为原矿中石英矿物含量不是决定石英高纯化程度的关键因素,石英矿物所含包裹体、尤其是气液包裹体是制约石英高纯化的关键因素。在系统总结国内外高纯石英矿床地质特征的基础上,提出在北秦岭、新疆阿尔泰、江西石城等地开展花岗伟晶岩型高纯石英资源的调查评价意义重大。

2020年,调查评价了北秦岭、阿尔泰地区的伟晶岩型高纯石英资源,构建了高纯石英“成矿远景区预测—调查区圈定—样品精准采集—预处理—选矿深度除杂—化学深度提纯—产品检测分析”的全链条调查评价体系,利用“构造特征+矿物组合+石英标型”的高纯石英找矿方法,在北秦岭地区发现伟晶岩型高纯石英矿体10余处,部分矿石经提纯加工,石英中SiO₂含量达到或超过99.995%,取得了伟晶岩型高纯石英资源的重大发现。

2021年,实地查证了北秦岭地区伟晶岩型高纯石英资源,对LD-5号矿体进行了槽探揭露和深部钻探

验证,控制了脉体的分布和延伸,估算高纯石英矿物资源量(控制+推断)69万t,达到高纯石英中型矿产地规模。

4 矿床对比与找矿方向

4.1 与美国 Spruce Pine 矿床对比

全球伟晶岩型高纯石英原料矿床主要为美国 Spruce Pine 矿床,其资源规模超过1 000万t,高纯石英砂供应量占全球供应量的90%以上^[10]。

Spruce Pine 矿床位于北卡罗莱纳州西部 Spruce Pine 镇,出露地层主要为前寒武纪 Ashe 组的云母和角闪片麻岩、片岩,少量白云母大理岩。花岗质岩石以小的岩体和伟晶岩脉的形式侵入 Ashe 组中,侵入年代在477~404 Ma之间,接近区域变质作用发生时间的高峰。伟晶岩在花岗岩和围岩中均有出露,部分花岗岩体中包含的伟晶岩块体体积超过50%^[11-12]。龙泉坪伟晶岩型高纯石英矿床位于古元古代秦岭岩群和中-新元古代峡河岩群的片麻岩、斜长角闪岩中,晚加里东一早海西期北秦岭杂岩地体北海盆发生陆内双向俯冲,俯冲过程中新元古代玄武质岩石重熔形成花岗质岩浆^[13],岩浆侵位后期形成富含挥发分且高度分异演化的岩浆热液,岩浆热液经过结晶分异作用形成石英中杂质极低的高纯石英矿。两者有相似的成矿背景和成矿作用过程。

Spruce Pine 矿床中伟晶岩的矿物成分主要为钠长石40%、石英25%、微斜长石20%、白云母15%,少量黑云母、石榴子石等。岩石中SiO₂含量74%~77%,Na₂O > K₂O,属过铝质碱性岩石,具有稀土总量低(11.6 × 10⁻⁶~17.7 × 10⁻⁶),轻稀土富集, Eu 正异常特征^[4]。龙泉坪矿床中的伟晶岩矿物成分主要为钠长石(31%~51%)、微斜长石(11%~20%)、石英(25%~38%)和白云母(7%~9%),含少量石榴子石、黑云母等, SiO₂含量76%~79%, Na₂O > K₂O,属过铝质、过碱性岩石,亦具有稀土总量低(1.6 × 10⁻⁶~8.0 × 10⁻⁶),轻稀土富集特征,但呈 Eu 负异常^[14]。两者有大致相似的岩石矿物成分和地球化学特征。

北秦岭地区伟晶岩脉数量多,规模大,新发现的卢氏龙泉坪石英矿床具有和美国 Spruce Pine 高纯石英矿床相似的地质特征,显示该地区具有寻找伟晶岩型高纯石英资源的潜力。

4.2 伟晶岩型高纯石英找矿方向

国内目前具有高纯石英潜力的原料产地主要为湖

北蕲春、江苏东海、安徽旌德和太湖等地,为热液脉型石英^[15],龙泉坪伟晶岩型高纯石英矿床的发现为高纯石英地质找矿提供了新思路。伟晶岩型高纯石英资源具有独特的地质背景,Spruce Pine 矿床和卢氏龙泉坪石英矿床均产于前寒武纪的古老变质岩中,与古生代的花岗质岩浆关系密切。分布于我国古老变质岩中的伟晶岩集中分布区是高纯石英资源的重要找矿远景区。北秦岭、新疆阿尔泰等地区伟晶岩分布广泛,且具有形成高纯石英资源的地质背景条件,建议加大北秦岭河南卢氏和陕西商南、新疆阿尔泰等地区的高纯石英调查评价研究。

美国矽比科公司选择高纯石英原料的标准主要有两项:一是选择晶体结构中杂质最少的石英,二是选择气液包裹体少的石英^[1]。石英中杂质含量和流体包裹体含量是制约高纯石英提纯的最主要因素^[16-17]。目前高纯石英产品质量分类主要以杂质含量为依据,如英国工业矿物手册定义高纯石英杂质总含量小于 50×10^{-6} ^[3];挪威地调局提出高纯石英杂质总含量应小于 50×10^{-6} 、Al 含量小于 30×10^{-6} 、Ti 含量小于 10×10^{-6} ^[18]。石英矿物中杂质元素的含量与岩浆体系中元素的含量相关,与稀有金属成矿相关的石英中往往具有较高的金属元素 Al、Li 含量,如江西某地稀有金属白岗岩石英中 Al 和 Li 的含量分别为 443.93×10^{-6} 和 68.09×10^{-6} ,河南卢氏南阳山含稀有金属矿化伟晶岩石英中 Al 和 Li 含量分别为 111.80×10^{-6} 和 14.61×10^{-6} 。石英中高含量的 Al、Li 杂质元素制约了石英最终加工处理后的纯度,因此应尽量选择不含稀有金属矿化的伟晶岩脉体开展地质找矿。

流体包裹体是影响高纯石英提纯的关键性因素。包裹体中的 K、Na 等杂质元素影响了高纯石英的纯度;包裹体中的水和气体间接导致石英管、石英坩埚等产品制备过程中气泡、气线瑕疵的产生,对产品表观质量造成严重影响。目前去除石英矿物中流体包裹体的方法主要为高温爆裂法,该方法较好适用于个体较大的流体包裹体,对于细小的流体包裹体去除效果不理想^[17];伟晶岩中石英内部的流体包裹体一般个体较小,多数在 $10 \mu\text{m}$ 以下,一般情况下对其较难去除。找矿中应重点关注流体包裹体含量低的伟晶岩脉。

5 结论

(1)河南卢氏龙泉坪伟晶岩型高纯石英矿和美国 Spruce Pine 高纯石英矿具有相似的成矿地质背景和地球化学特征,显示北秦岭地区具有寻找伟晶岩型高纯石英资源的潜力。

(2)杂质元素和包裹体是制约高纯石英品质的关键因素,不含稀有金属矿化、流体包裹体含量低的伟晶岩脉体是寻找高纯石英资源理想的目标地质体。

(3)该地区伟晶岩型高纯石英矿床的首次发现,对我国高纯石英地质勘查具有重要的示范和引领作用。建议加大对北秦岭和新疆阿尔泰等地区的高纯石英调查评价工作。

参考文献:

- [1] 汪灵,党陈萍,李彩侠,等. 中国高纯石英技术现状与发展前景[J]. 地学前缘, 2014, 21(5): 267-273.
WANG L, DANG C P, LI C X, et al. Technology of high-purity quartz in China: Status quo and prospect[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(5): 267-273.
- [2] 汪灵. 石英的矿床工业类型与应用特点[J]. 矿产保护与利用, 2019(6): 39-47.
WANG L. Industrial types and application characteristics of quartz ore deposits[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019(6): 39-47.
- [3] 郭万达,韩跃新,朱一民,等. 高纯石英砂资源及加工技术分析[J]. 金属矿山, 2019(2): 22-28.
GUO W D, HAN Y X, ZHU Y M, et al. Analysis of high-purity quartz sand resources and its processing technology[J]. Metal Mine, 2019(2): 22-28.
- [4] 张晔,陈培荣. 美国 Spruce Pine 与新疆阿尔泰地区高纯石英伟晶岩的对比研究[J]. 高校地质学报, 2010, 16(4): 426-435.
ZHANG Y, CHEN P R. Characteristics of granitic pegmatite with high-purity quartz in Spruce Pine region, USA and Altay region of Xinjiang, China[J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16(4): 426-435.
- [5] 陈金铨,包民伟,张迎年,等. 河南卢氏伟晶岩脉及典型钽铌矿床成矿地质特征[J]. 矿产保护与利用, 2014(4): 13-17.
CHEN J D, BAO M W, ZHANG Y N, et al. The metallogenic geological characteristics of pegmatite veins and typical tantalum-niobium ore deposit in Lushi county of Henan[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2014(4): 13-17.
- [6] 胡呈祥,包民伟,李贞岐,等. 豫西伟晶岩型稀有金属矿勘查方法[J]. 现代矿业, 2016(5): 156-172.
HU C X, BAO M W, LI Z Q, et al. Exploration method for pegmatite type rare metal deposits in western Henan[J]. Modern Mining, 2016(5): 156-172.
- [7] 曲凯,尹青青,刘行,等. 北秦岭柳树湾花岗伟晶岩型铀矿床中黑云母矿物化学特征及其地质意义[J]. 铀矿地质, 2016, 35(6): 330-342.
QU K, YIN Q Q, LIU X, et al. Mineral chemistry feature and its geological significance of biotite from liushuwan granitic pegmatite type uranium deposit in North Qinling orogen[J]. Uranium Geology, 2016, 35(6): 330-342.
- [8] 张成立,刘良,王涛,等. 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, 2013, 58(23): 2323-2329.
ZHANG C L, LIU L, WANG T, et al. Granitic magmatism related to early Paleozoic continental collision in the North Qinling belt[J]. Chin Sci Bull, 2013, 58(23): 2323-2329.

- [9] 王涛,张宗清,王晓霞,等. 秦岭造山带核部新元古代碰撞变形及其时代—强变形同碰撞花岗岩与弱变形脉体锆石 SHRIMP 年龄限定[J]. 地质学报,2005,79(2):220-231.
WANG T, ZHANG Z Q, WANG X X, et al. Neoproterozoic collisional deformation in the core of the Qinling orogen and its age: constrained by zircon SHRIMP dating of strongly deformed syn-collisional granites and weakly deformed granitic veins [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(2): 220-231.
- [10] 王九一. 全球高纯石英原料矿的资源分布与开发现状[J]. 岩石矿物学杂志[J]. 2021,40(1):131-141.
WANG J Y. Global high purity quartz deposits: Resources distribution and exploitation status[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2021, 40(1): 131-141.
- [11] MILLER B V, FETTER A H, STEWART K G. Plutonism in three orogenic pulses, Eastern Blue Ridge Province, southern Appalachians[J]. Geological Society of America Bulletin, 2006, 118(1/2): 171-184.
- [12] SWANSON S E, VEAL W B. Mineralogy and petrogenesis of pegmatites in the Spruce Pine District, North Carolina, USA[J]. Journal of Geosciences, 2010, 55: 27-42.
- [13] 李伍平,王涛,王晓霞. 北秦岭灰池子花岗质复式岩体的源岩讨论——元素—同位素地球化学制约[J]. 地球科学(中国地质大学学报),2001,26(3):269-278.
LI W P, WANG T, WANG X X. Source of huichizi granitoid complex pluton in northern Qinling, central China: constrained in element and isotopic geochemistry [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2001, 26(3): 269-278.
- [14] 张勇,刘国奇,刘颖,等. 典型高纯石英矿点成矿地质环境调查成果报告[D]. 南昌:东华理工大学,2021:6-9.
ZHANG Y, LIU G Q, LIU Y, et al. Report on the results of geological environment investigation on the formation of a typical high-purity quartz ore site [D]. Nanchang: Donghua University of Technology, 2021: 6-9.
- [15] 焦丽香. 我国脉石英资源开发利用现状及供需分析[J]. 中国非金属矿工业导刊,2019(2):11-14.
JIAO L X. Current situation and supply demand analysis of the development and utilization of vein quartz resources in China[J]. China Non-metallic Minerals Industry, 2019(2): 11-14.
- [16] 张海敏,马亚梦,谭秀民,等. 高纯石英中杂质特征及深度化学提纯技术研究进展[J/OL]. 矿产保护与利用,2022. DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.01.031.
ZHANG H Q, MA Y M, TAN X M, et al. Research progress on impurity characteristics and deep chemical purification technology in high-purity quartz [J/OL]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022. DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.01.031.
- [17] 张海敏,倪文山,刘磊,等. 低射频功率—电感耦合等离子体质谱法测定高纯石英样品中痕量钾[J/OL]. 矿产保护与利用,2022. DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.01.033.
ZHANG H Q, NI W S, LIU L, et al. Determination of ultra-trace potassium in high purity quartz by low RF power-inductively coupled plasma mass spectrometry [J/OL]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022. DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.01.033.
- [18] MÜLLER A, WANVIK J E, IHLEN P M. Petrological and chemical characterisation of high-purity quartz deposits with examples from Norway [C]//GÖTZE J, MÖCKEL R. Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics. Berlin: Springer-Verlag, 2012:71-118.
- [19] 马超,冯安生,刘长森,等. 高纯石英原料矿物学特征与加工技术进步[J]. 矿产保护与利用,2019(6):48-57.
MA C, FENG A S, LIU C M, et al. Mineralogical characteristics and progress in processing technology of raw materials of high purity quartz [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019(6): 48-57.