

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

贾龙¹⁾, 樊献科¹⁾, 张海啟^{2, 3)}, 朱黎宽²⁾, 王红杰²⁾, 田明君^{4, 5)}, 于得水²⁾, 王守敬²⁾

1) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037

2) 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 郑州, 450006

3) 中国地质调查局, 北京, 100037

4) 矿冶科技集团有限公司, 北京, 100160

5) 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京, 102628

内容提要: 高纯石英矿作为新矿种, 是现代化高新技术产业发展的重要原料。北秦岭龙泉坪高纯石英矿床的发现是我国在伟晶岩型高纯石英矿床找矿领域取得的重要突破, 但其成因机理目前尚不清楚。在详细的矿床地质特征和岩相学研究基础上, 本文选取龙泉坪10号高纯石英伟晶岩脉中的铌钽铁矿和白云母开展原位 U-Pb、Rb-Sr 和⁴⁰Ar-³⁹Ar 等同位素年代学研究, 以限定高纯石英矿床的形成时代、成矿地质背景和后期变质改造历史。研究结果显示, 龙泉坪10号伟晶岩脉中铌钽铁矿 U-Pb 年龄为 422.1 ± 2.8 Ma, 与该区稀有金属伟晶岩成矿高峰期(430~410 Ma) 基本一致, 可能均形成于碰撞后伸展环境。白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 和原位 Rb-Sr 年龄分别为 330.5 ± 3.2 Ma 和 306.0 ± 15.0 Ma, 明显晚于铌钽铁矿 U-Pb 年龄(422.1 Ma), 但与前人获得的北秦岭地区 320~300Ma 的变质热事件近于一致, 表明伟晶岩中的⁴⁰Ar-³⁹Ar 和 Rb-Sr 同位素体系在后期变质事件中发生了重置, 从而记录了高纯石英伟晶岩形成后经历的变质改造历史。结合石英岩岩相学特征表明, 龙泉坪高纯石英伟晶岩脉与美国 Spruce Pine、挪威 Tysfjord 等世界上典型的伟晶岩型高纯石英矿床相似, 在形成之后都经受了多期不同程度的变质改造, 引起石英发生韧性变形和动态重结晶作用, 促进了杂质元素迁移和包裹体含量降低, 导致高纯石英的形成。因此, 后期变质变形改造可能是伟晶岩型高纯石英矿床形成的重要条件。

关键词: 铌钽铁矿 U-Pb 年龄; 白云母原位 Rb-Sr 年龄; 白云母原位⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄; 高纯石英; 伟晶岩; 龙泉坪矿床; 北秦岭

自然资源部 2025 年 4 月 10 日发布公告, 高纯石英矿成为我国第 174 号新矿种。高纯石英是新一代信息产业、新能源产业等战略性新兴产业的关键基础材料, 具有耐高温、耐腐蚀、强度高、透光率高、热膨胀系数低等优异的理化特性, 广泛应用于半导体芯片、光纤、光伏、光学、电光源等重要领域(汪灵, 2019; 张海啟等, 2022a), 被誉为“信息时代的基石”, 因此高纯石英资源的供给保障对于确保我国在未来相关战略性新兴产业竞争中获得优势具有重要意义。

目前高纯石英矿的具体定义尚未统一。高纯石英主要以杂质元素总量为判别标准, 此前使用最广泛的是 Harben (2002) 提出的标准: 石英中 SiO₂ 质量分数达到 99.995% (4N5) 为高纯石英, 达到 99.998% (4N8) 是高端高纯石英。Müller 等 (2012) 在此基础上根据各杂质元素对石英玻璃性质的影响, 提出了高纯石英各杂质元素含量标准: Al < 30 × 10⁻⁶, Ti < 10 × 10⁻⁶, Na < 8 × 10⁻⁶, K < 8 × 10⁻⁶, Li < 5 × 10⁻⁶, Ca < 5 × 10⁻⁶, Fe < 3 × 10⁻⁶, P < 2 × 10⁻⁶, B < 1 × 10⁻⁶。美国尤尼明公司 IOTA 系列产品是国际高纯石英产

注: 本文为科技部国家重点研发计划项目(编号: 2024YFC2910101)、国家自然科学基金委地质联合基金资助项目(编号: U2344206)、中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20250208807)和矿冶科技集团有限公司“揭榜挂帅”科研基金资助项目(编号: JTKY202427822)的成果。

收稿日期: 2025-10-21; 改回日期: 2026-01-08; 网络首发: 2026-01-20; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2026.01.065

作者简介: 贾龙, 男, 2001 年生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业; Email: sterling008@163.com。通讯作者: 樊献科, 男, 1986 年生, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事锡钨和高纯石英矿床成矿作用研究; Email: fanxianke009@163.com。



品的标杆,其产品中的12种元素杂质(Al、K、Na、Li、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Cr、Ni、B)含量之和小于 20×10^{-6} ,且元素K、Na、Li含量分别小于 1×10^{-6} , SiO_2 质量分数更是达到99.998%以上。我国学者汪灵(2022)根据石英中 SiO_2 的质量分数,将高纯石英产品分为低端(3N)、中端(4N)、中高端(4N5)和高端(4N8),又根据Al、Ti、Li等13种杂质的含量将高纯石英产品分为低端($\leq 1000 \times 10^{-6}$)、中端($\leq 100 \times 10^{-6}$)、中高端($\leq 50 \times 10^{-6}$)和高端($\leq 20 \times 10^{-6}$)。

我国是高纯石英消费大国,而一般的石英通过加工提纯极难应用于制作高纯石英产品,能够生产高纯石英的石英原料极为稀缺,因此高端石英产品极度依赖进口,国内资源供需矛盾十分突出(贾德龙等,2019)。高纯石英原料的来源包括水晶、脉石英、花岗伟晶岩等。随着我国天然水晶资源日渐匮乏,脉石英成为我国高纯石英产品原料的主要来源,而国内可满足当前提取高纯石英技术条件的脉石英保有资源储量仅7.099 Mt(焦丽香等,2019),难以供应光伏、电子信息等产业长久发展的需要(王登红等,2025)。在此背景下,伟晶岩型高纯石英因其规模大、晶粒粗大、杂质元素含量低等独特优势,引起了广泛关注。世界上绝大部分的高纯石英砂原料都产自美国北卡罗来纳州Spruce Pine地区的花岗伟晶岩,美国尤尼明公司以此为原料生产的IOTA系列高纯石英砂目前依然垄断着国际市场上4N8级以上高端石英砂的供给(赵金洲等,2022)。近几年来,随着中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所等研究团队在北秦岭、新疆阿勒泰等地区陆续发现了多处伟晶岩型高纯石英矿床,实现了伟晶岩型高纯石英资源的重大找矿突破,其中北秦岭卢氏地区高纯石英样品经实验室提纯纯度达4N7级,具有寻找高端高纯石英资源的巨大潜力和广阔前景。

目前国内外对伟晶岩型高纯石英矿床的研究程度较低,尤其对其成矿地质背景和成因机理都缺乏系统研究,伟晶岩型高纯石英矿床是否形成于特定的成矿地质背景目前尚不明确,这些都严重制约了高纯石英资源的进一步找矿突破,难以寻找更多更高端的高纯石英矿床。因此,本研究选取北秦岭卢氏地区龙泉坪高纯石英伟晶岩为研究对象,开展伟晶岩中铀钼铁矿U-Pb年代学、白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 和原位Rb-Sr年代学研究,以限定高纯石英伟晶岩的形成时代,结合区域构造演化和变质变形事件,探讨伟晶岩型高纯石英矿床形成的地质背景,揭示其后期变质改造历史,丰富和发展伟晶岩型高纯石英矿床

成矿理论。

1 区域地质背景

秦岭造山带是经历长期多次不同造山作用而形成的复合型大陆造山带(张国伟等,1996),东部可连接到桐柏—大别山(图1a),西部分为三支与祁连、昆仑和松潘相连(张国伟等,1997)。秦岭造山带东部自北向南可分为华北陆块南缘、北秦岭造山带、南秦岭以及华南陆块北缘。其现今主体格架是由于三个板块(华北地块南部、秦岭微板块、扬子地块北缘)沿两条缝合带(商南—丹凤缝合带、勉县—略阳缝合带)相互碰撞后又叠加陆内造山而形成(图1b、c)(张国伟等,1995,2019)。

秦岭造山带主要经历了新元古代、古生代和中生代造山作用,伴随有大量的岩浆活动(Wang Tao et al., 2009)。新元古代造山作用形成于同碰撞至后碰撞的构造环境,集中发生陆块的汇聚和裂解,该时期花岗岩以具有强烈变形为特征。古生代时期,北秦岭地区经历了从俯冲到碰撞的构造转换,形成了大量花岗岩,产生数量众多的伟晶岩型稀有金属矿床。北秦岭造山带东部最大的S型花岗岩漂池岩体、I型花岗岩灰池子岩体均于此时期形成(图1c)。此外还形成了许多规模较小的正长花岗岩体(王梦玺等,2022)。中生代时期岩浆热事件主要发生在西、南秦岭,被认为是秦岭地块和扬子克拉通板块俯冲或碰撞的结果(王晓霞等,2015)。

北秦岭造山带位于洛南—栾川断裂带与商南—丹凤缝合带之间,由北向南依次出露宽坪岩群、二郎坪岩群、秦岭岩群、松树沟蛇绿岩片和丹凤岩群(董云鹏等,2003)。宽坪岩群主要岩石类型为绿片岩、斜长角闪岩、云母石英片岩—片麻岩和大理岩,经历多期复杂的变形作用,变质程度为绿片岩相—低角闪岩相(李承东等,2018)。二郎坪岩群主要为一套火山沉积岩系,主要由蛇绿岩单元、碎屑沉积岩及碳酸盐岩组成,变质程度为低绿片岩相至角闪岩相,岩性主要为变质碎屑岩、云母片岩、大理岩及变质基性火山岩等(刘丙祥等,2014)。秦岭岩群是北秦岭造山带中最重要和最古老的岩石组成单元,记录了秦岭造山带早期的地壳形成和演化历史,是一套历经多期变质变形和岩浆作用的中深变质结晶基底杂岩系,变质程度普遍达角闪岩相、局部麻粒岩相,其岩性以成熟度相对较低的陆缘碎屑岩和碳酸盐岩沉积建造为主,含有少量基性火山岩,主要由含石榴子石黑云斜长片麻岩、石榴矽线片麻岩、斜长角闪岩、钙

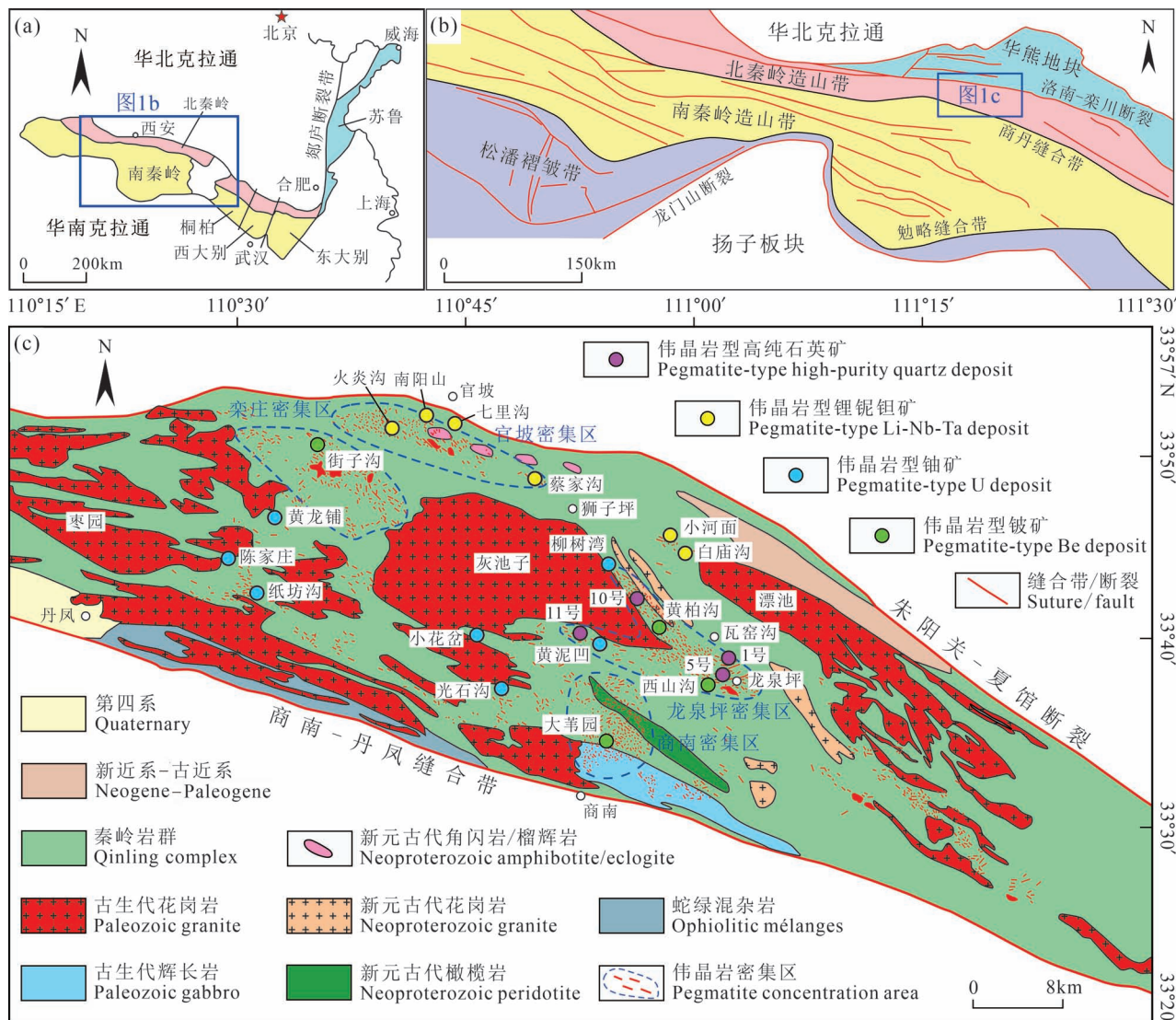


图 1(a)秦岭—桐柏—大别—苏鲁造山带简图(据 Qin Zhengwei et al., 2015);(b)秦岭造山带简要构造格架(据 Yuan Feng et al., 2022);(c)北秦岭区域地质、主要伟晶岩矿床及伟晶岩密集区分布图(据刘新星等,2023)

Fig. 1(a)Simplified geological map of the Qinling—Tongbai—Dabie—Sulu orogenic belt(after Qin Zhengwei et al., 2015);(b) simplified tectonic framework of the Qinling Orogen(Yuan Feng et al., 2022);(c) map showing the Northern Qinling region, pegmatite deposits and pegmatite concentration areas(Liu Xinxing et al., 2023&)

硅酸盐及大理岩等组成(时毓等,2009;王盘喜等,2017)。松树沟蛇绿岩是北秦岭地体内出露规模最大的超基性纯橄岩体,主要由细粒糜棱纯橄岩、中粗粒纯橄岩、方辉橄岩及橄岩透辉岩等岩石类型组成。丹凤群为一套强烈变形变质且以火山碎屑沉积岩组合为主要组成部分的构造混杂岩带,主要由基性熔岩、枕状玄武岩、辉绿岩墙、硅质岩等组成,局部地段出露的基性火山岩可见枕状构造,具有强烈而复杂的变形变质和组成结构特征(王江波等,2015)。

北秦岭地区东部发育大量伟晶岩型矿床,分布在灰池子岩体、漂池岩体等古生代花岗岩岩体周围,主要集中于官坡、商南、栾庄、龙泉坪四个伟晶岩密集区(图 1c)。伟晶岩型矿床矿化元素种类多样,包括 Nb、Ta、Be、Rb、Li、Cs、REE、U、Sn 等,稀有金属矿物有锂辉石、锂云母、绿柱石、铌钽铁矿、锂电气石、铯沸石、锡石、细晶石、黑稀金矿、复稀金矿、白云母、黑云母、蛭石等。与 Li—Cs—Nb—Ta 等矿化相关的伟晶岩多为白云母伟晶岩,与 U 矿化相关的伟晶岩主要为黑云母伟晶岩。在空间分布上, Li—Be 等稀

有金属矿化伟晶岩在区域上多沿灰池子复式岩体以北的栾川—朱夏断裂和蔡川断裂分布,少量产出于商丹缝合带北侧的商南地区(凤永刚等,2024),如官坡地区以Li—Cs—Nb—Ta矿化为主,区内伟晶岩

可见大块锂辉石、锂云母等富Li矿物,其余密集区主要含有Be—Nb—Ta和U矿化(表5)(Yang Zhaoyu et al., 2022)。典型的稀有金属矿床包括南阳山Li—Nb—Ta矿床、蔡家沟Nb—Ta矿床、火炎

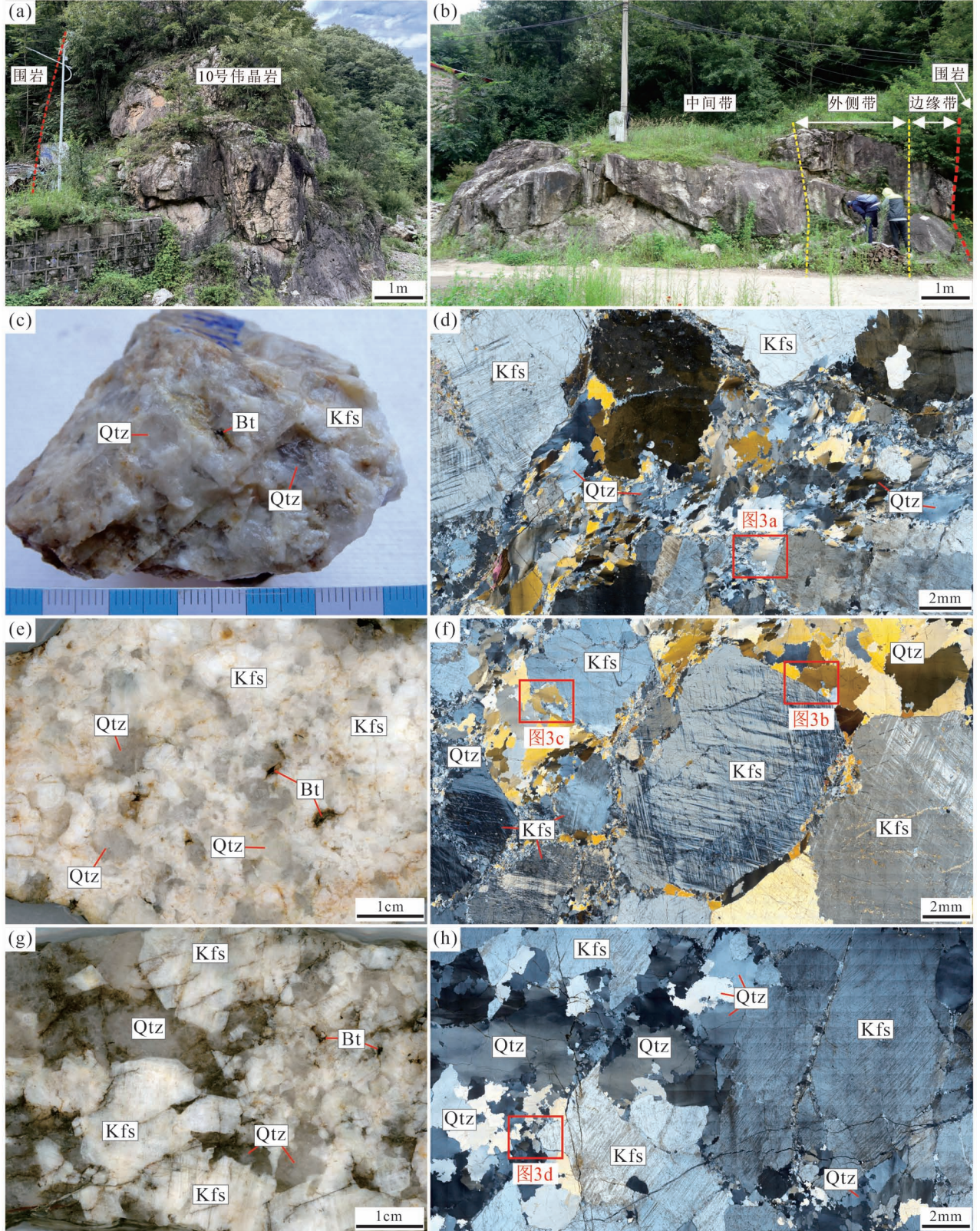


图2 龙泉坪10号脉野外露头、手标本与镜下照片:(a)(b)10号脉野外露头照片;(c)(d)边缘带手标本和正交偏光显微照片;(e)(f)外侧带手标本和正交偏光显微照片;(g)(h)中间带手标本和正交偏光显微照片

Fig. 2 Field outcrop, hand specimen, and microscopic photographs of the Longquanping No. 10 vein: (a) (b) Field outcrop photographs of the No. 10 vein; (c) (d) hand specimen and cross-polarized light microscopic photographs of the border zone; (e) (f) hand specimen and cross-polarized light microscopic photographs of the outer zone; (g) (h) hand specimen and cross-polarized light microscopic photographs of the intermediate zone

沟 Sn—Nb—Ta 矿床、七里沟—前台 Li—Be—Nb—Ta 矿床、小花盆 U 矿床、纸坊沟 U 矿床、陈家庄 U 矿床等(陈雷等, 2023; 周起凤等, 2024; 陈国超等, 2025)。根据稀有金属矿化组合, 可将北秦岭伟晶岩划分为 Nb—Ta 型、Be—白云母型、Be—Nb 型、Li—Be 型和 Cs—Ta 型。根据卢欣祥等(2010)所述, 该区花岗伟晶岩可划分为 7 种类型, 包括黑云母—微斜长石型、二云母—微斜长石型、白云母—微斜长石型、白云母—微斜长石—钠长石型、白云母—钠长石型、锂云母—微斜长石—钠长石型和锂云母—钠长石型。伟晶岩脉大多数分布于背斜层的轴向部分和边缘, 受区域深部断裂带和从属断裂带控制, 其围岩主要由黑云母—斜长石—角闪石片岩、片麻岩、大理石、透辉石—大理石、辉石岩、辉长岩和橄榄岩组成(Luan Shiwei, 1984)。

2 矿床地质特征

北秦岭地区东部 84% 的伟晶岩集中于官坡、峦庄、龙泉坪与商南四个伟晶岩密集区(图 1c), 其中龙泉坪伟晶岩密集区位于灰池子岩体东南, 长约 15.5 km, 宽 3~4 km, 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° 左右。区内发育小规模脆性断裂与褶皱。伟晶岩脉多沿背斜轴部、断裂和层间裂隙侵位, 呈脉状和透镜状分布, 少数切割片理和构造线, 与围岩的侵入接触关系明显(卢欣祥等, 2010)。

龙泉坪伟晶岩密集区是我国重要的伟晶岩型高纯石英矿床发育地之一, 发育有龙泉坪 5 号脉、10 号脉等多条 4N5 级以上的伟晶岩型高纯石英矿脉和多处 4N 级以上的伟晶岩型高纯石英矿点(图 1c)。根据前人研究, 伟晶岩型高纯石英样品经提纯后 SiO₂ 纯度普遍可达到 99.995%, 部分可达 99.997%。晶格杂质含量一般较低, 其中最难去除的杂质如 Al、Ti 的含量分别小于 30×10⁻⁶、6×10⁻⁶(表 1)。张海啟等(2022b)报道对龙泉坪 10 号脉的提纯结果为 4N5 (99.995%), 但随着近几年提纯技术的进一步提高, 目前对龙泉坪 10 号脉最新提纯

结果显示伟晶岩石英样品 SiO₂ 含量可达 4N6 (99.996%), 关键杂质元素 Al、Ti 含量可分别降低至 17.94×10⁻⁶、12.84×10⁻⁶(朱黎宽高级工程师私人通讯)。

龙泉坪 10 号脉位于灰池子岩体东侧, 出露围岩地层为古元古界秦岭岩群石槽沟组与中—新元古界峡河岩群寨根组(图 2a、b)。石槽沟组岩性主要为黑云片麻岩、二云母片麻岩、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(张海啟等, 2022a; 郭峰等,

表 1 代表性伟晶岩样品经化学深度提纯后主要杂质元素含量(据张海啟等, 2022b; 郭峰等, 2024)

Table 1 Main impurity elements content of representative pegmatite samples after chemical deep purification (after Zhang Haiqi et al., 2022b; Guo Feng et al., 2024)

样品编号	LS-230	LS-231	LD-05	LD-10	LS12	DL106	IOTA-CG
Al	16.54	26.27	24.8	18.6	26.5	41.4	14.00
Ca	3.05	4.72	2.15	5.66	2.28	0.57	0.60
Fe	0.13	0.28	1.23	0.55	0.30	0.12	0.30
K	0.62	0.40	0.60	1.14	1.32	0.40	0.70
Mg	0.21	0.09	0.13	0.11	0.00	0.00	0.04
Na	1.00	4.84	5.66	3.32	2.96	2.58	1.00
Ti	4.35	3.55	3.35	12.5	5.65	5.64	1.20
B	0.00	1.67	1.43	0.65	0.37	0.82	<0.10
Cr	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Cu	0.05	0.16	0.01	0.13	0.04	0.00	0.02
Li	3.34	0.40	0.45	0.09	1.00	1.07	0.50
Mn	0.14	0.31	0.12	0.05	0.07	0.06	0.03
Ni	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	>0.00
P	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10
Zr	0.01	0.02	0.11	0.11	0.05	0.00	0.00
SiO ₂	99.997	99.995	99.996	99.995	99.995	99.994	99.998

注: SiO₂ 单位为%, 其他元素单位为 μg/g; LS-230、LS-231、LD-5 三件样品均采自龙泉坪 5 号高纯石英伟晶岩脉, 其中 LS-230 采自钻孔, 其余两件采自地表; LD-10 采自龙泉坪 10 号高纯石英伟晶岩脉; LS12 和 DL106 两件样品采自北秦岭东段的含石榴子石花岗岩伟晶岩、含电气石花岗岩伟晶岩; IOTA-CG 为美国尤尼明公司生产的 IOTA 系列高纯石英砂产品, 原料来自美国 Spruce Pine 高纯石英伟晶岩矿床。

2024)。赋矿岩体为含黑云母钾长伟晶岩,呈致密块状构造,自形粒状结构和伟晶结构,主要矿物为钾长石、石英、黑云母,少量斜长石和白云母,副矿物包括锆石、磷灰石、独居石等,其中长石含量占40%~50%,石英含量占30%~45%,黑云母含量较少,占5%~10%。根据矿物组合和颗粒大小,可将10号脉分为边缘带、外侧带和中间带(图2b)。边缘带矿物颗粒较细,长石含量60%~70%,钾长石含量多于斜长石,石英含量15%~25%,云母含量10%~15%,黑云母含量多于白云母且自形程度较好,局部可见大块片状集合体(图2c)。镜下观察显示石英与钾长石自形程度较差,石英具有明显的拉长和定向特征(图2d)。外侧带粒度相较边缘带变粗,长石含量较高,自形程度好(图2e)。石英多分布于粗粒钾长石间隙。长石含量50%~60%,石英含量15%~25%,云母含量10%~15%(图2f)。中间带长石与石英晶体粗大,自形程度较高,长石含量40%~50%,石英含量35%~45%,云母含量5%~10%,仍以黑云母为

主(图2g,h)。此外,10号脉中的石英在正交偏光镜下常见波状消光,且边缘普遍为不规则的锯齿状、港湾状(图3),表现为缝合线结构,在缝合线位置还多见微小的石英亚颗粒(图3c,d),表明石英发生了明显的重结晶现象。

3 分析方法

本研究在龙泉坪10号伟晶岩脉采集12件无明显蚀变的伟晶岩样品,从中挑选出钨钼铁矿、白云母开展U-Pb和 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素年代学测试,在150 μm 厚的激光片上开展白云母原位Rb-Sr同位素测年。样品粉碎、单矿物挑选、激光片磨制工作均在廊坊市辰昌岩矿检测技术服务有限公司完成。每件样品选取代表性的200粒钨钼铁矿和标样用环氧树脂固定在直径为25mm的靶上,经研磨抛光至暴露出晶体近中心的截面。随后对靶上的钨钼铁矿进行透射光和反射光拍照,为了对样品表面特征和内部结构进行详细观察以选取最优激光测试点,又对钨钼

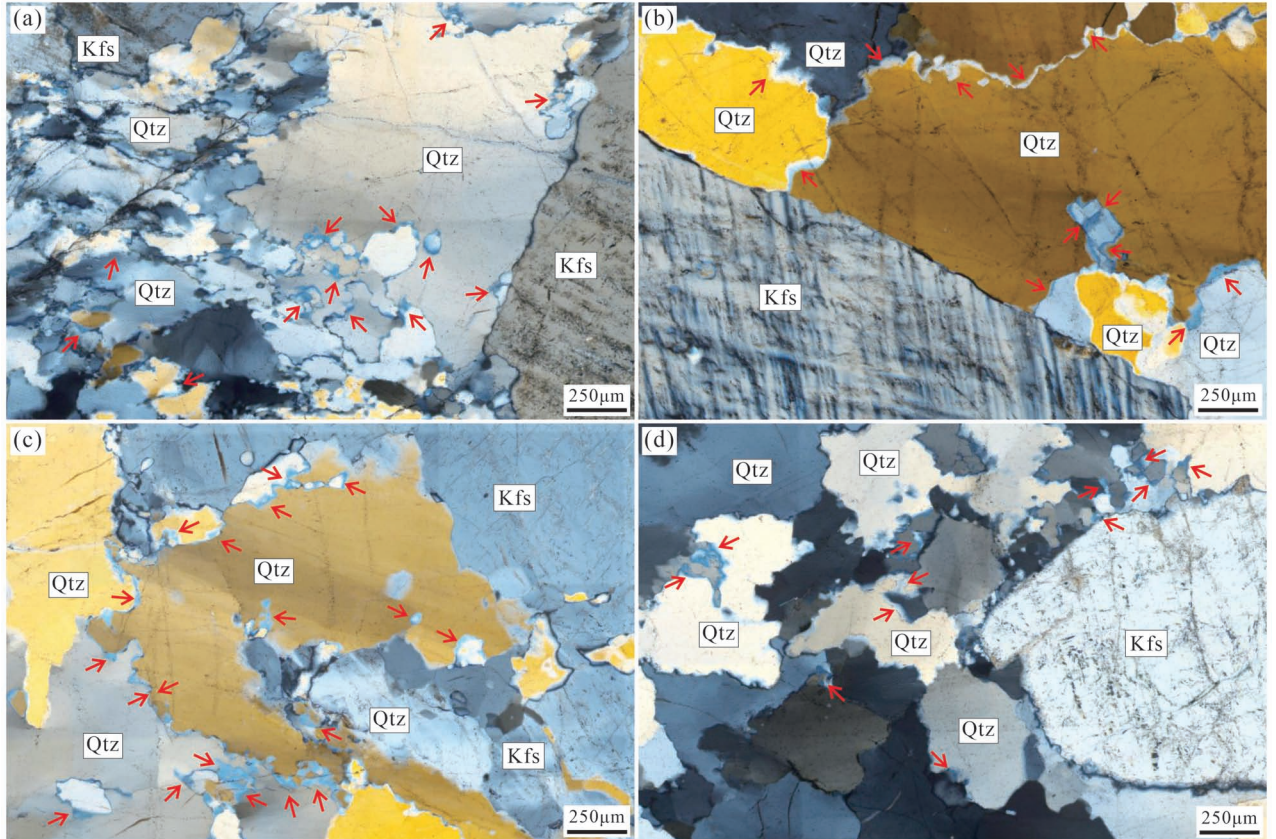


图3 龙泉坪10号伟晶岩脉中石英重结晶现象(红色箭头指示重结晶位置)

Fig. 3 Recrystallization phenomena of quartz in the Longquanping No. 10 pegmatite vein (red arrows indicate recrystallization sites)

铁矿进行了背散射成像(BSE)分析。铌钽铁矿样品制靶、透反射光和BSE拍照均在北京铍年领航科技有限公司进行,BSE拍照运用JEOL-JXA8230型号电子探针完成。

铌钽铁矿U-Pb同位素测年在北京燕都中实测试技术有限公司实验室进行,采用193nmNWR193Ar-F准分子激光器与Analytikjena PlasmaQuant MS四极杆ICP-MS耦合完成。实验过程中采用铌钽铁矿ZTA01为内部标样(ID-TIMS年龄为 263.7 ± 1.7 Ma)对U-Pb年代学数据进行校准。标准铌钽铁矿石139(ID-TIMS年龄为506.0 Ma; Che Xudong et al., 2015; Melcher et al., 2015)作为外标进行仪器漂移、质量偏差和U-Pb比值的分馏使用标准样品包围方法进行校正。以SRM610为外标,定量铌钽铁矿微量元素浓度。对铌钽铁矿的每次分析都从15秒的空白气体测量开始,然后在激光打开时再进行40秒的分析时间。使用激光在7Hz和约 1.8 J/cm^2 的密度下,采用 $30 \mu\text{m}$ 束斑对铌钽铁矿进行分析。以 0.6 L/min 的速率流淌的He载气将被激光烧蚀的颗粒带出腔室,与氦气混合并输送到等离子炬。测得的同位素为 ^{55}Mn 、 ^{57}Fe 、 ^{93}Nb 、 ^{181}Ta 、 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 、 ^{208}Pb 、 ^{232}Th 、 ^{235}U 和 ^{238}U ,与其他元素相比,Pb同位素的计数时间更长。使用ICPMSDataCal软件和ZSkits软件离线校正原始数据(Liu Yongsheng et al., 2008, 2010; Cai Pengrui et al., 2020)。使用Chew等(2014)详细概述的基于 ^{207}Pb 的校正方法对普通Pb进行校正。采用Isoplot4.15计算U-Pb年龄,得到Tera—Wasserburg图中较低的截距年龄,可作为常见含铅矿物的形成时间(Chew et al., 2011, 2014)。

白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素测年在中国地质科学院地质研究所热年代学实验室完成。将所选白云母样品进行粉碎、筛选至40~60目,在双目镜下人工挑选出纯度大于99%的白云母。称取适量挑选好的白云母样品用超声波清洗,用铝箔将每个样品进行单独包装,每隔3~4个样品插入一个标准样品,用于监视中子通量,铝箔管中的样品高度不超过3cm,然后各铝箔管再被封进石英瓶中送核反应堆中接受热快中子照射。照射总时间为1680min,用做监控样的标准样品为国内黑云母标样,编号:ZBH-25黑云母,其标准年龄为 132.7 ± 1.2 Ma(1σ)(王松山,1983),K的质量分数为7.6%。照射后的样品在核反应堆中静置大约3个月后取回分析。样品取回后装入圣诞树型容样管中,接入真空系统,然后给

熔样炉和相关管道加热抽真空,待本底达到要求后进行分析。样品的阶段升温加热使用高真空石墨炉,每一个阶段加热10min,放出的气体经Zr/Al吸气泵纯化10min,然后纯化后的气体进入多接收稀有气体质谱仪进行氩同位素分析。多接收稀有气体质谱仪为英国生产,型号为GV Helix MC。测试时每个峰值均采集20组数据。所有的数据在回归到时间零点值后再进行质量歧视校正、大气氩校正、空白校正和干扰元素同位素校正。 ^{37}Ar 经过放射性衰变校正; ^{40}K 衰变常数 $\lambda = 5.543 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ (Steiger and Jager, 1977);大气氩的 $n(^{40}\text{Ar})/n(^{36}\text{Ar})$ 值采用 298.56 ± 0.31 (Lee et al., 2006)。用ArArCALC程序(v2.5.2; Anthony, 2012)计算坪年龄及正、反等时线。坪年龄误差以 2σ 给出。

白云母原位Rb-Sr同位素测年在广州市拓岩检测技术有限公司实验室完成,采用NWR193nmArF准分子激光烧蚀系统与Agilent8900四极杆型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)联用进行测试,分析束斑为 $30 \mu\text{m}$ 。烧蚀在高纯度的He气体环境中进行,然后与Ar气体混合,然后将样品引入ICP-MS测试。反应气体 N_2O 被用来抑制荷质比相同的元素干扰: N_2O 是一种高效的反应气体,能够与 Sr^+ 反应生成 SrO^+ 离子,但与 Rb^+ 不反应。在烧蚀BHVO-2G和Mica-Mg的同时,通过增加反应池中 N_2O 的流速和监测 Sr^+ 和 SrO^+ 的灵敏度来优化反应速率。在 $0.25 \sim 0.27 \text{ mL/min}$ 的 N_2O 的清洗下, SrO^+ 信号在 Rb^+ 信号中无显著损失而达到最大。在测量样品之前,将 N_2O 连接到iCAPTQ中的第4质量流量控制器,并以 0.25 mL/min 的 N_2O 清洗管线2h以保持稳定。这一过程冲洗气体杂质并使系统饱和,最大限度地减少由于反应速率变化引起的漂移。然后通过线扫描方式烧蚀NISTSRM610(光斑尺寸 $30 \mu\text{m}$;脉冲重复频率10Hz;能量密度 $\sim 3.5 \text{ J/cm}^2$)。每次分析包括30s背景采集,然后120s烧蚀和30s冲洗。停留时间为50ms,用于分析Sr的质量和数量偏移同位素(^{86}Sr 、 ^{87}Sr 和 ^{88}Sr , $^{86}\text{Sr}^{16}\text{O}$ 、 $^{87}\text{Sr}^{16}\text{O}$ 和 $^{88}\text{Sr}^{16}\text{O}$)和 ^{85}Rb 。分析样品时典型的激光设置为光斑尺寸 $110 \mu\text{m}$ 、 $\sim 3.5 \text{ J/cm}^2$ 和8Hz脉冲重复。详细的仪器和分析条件按照Gorojovsky和Alard(2019)和Wang Chengyuan等(2022)中描述的方法设置。原始数据离线导出,整个数据处理过程使用内部Excel宏程序进行。

4 测试结果

4.1 铌钽铁矿 U-Pb 同位素测年

本文对龙泉坪 10 号脉外侧带高纯石英伟晶岩样品(24QL-31B3)中的铌钽铁矿进行 U-Pb 同位素定年,实验数据见表 2。实验样品选用的铌钽铁矿矿物大小在 100~300 μm ,长宽比 4:1~1:1,半透明,自形程度较高,背散射图像显示其内部成分均匀,无环带发育,未见明显热液交代特征(图 4),表明其为岩浆成因。本文选取成分均匀、无蚀变特征的 30 粒铌钽铁矿颗粒进行了 U-Pb 同位素分析,样品的 $n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$ 、 $n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{Pb})$ 、 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{Pb})$ 的变化范围分别为 0.05422~0.07165、0.4987~0.6866、0.06550~0.07004。大部分铌钽铁矿颗粒的 U、Th 含量变化较大,含量分别在 219~1010 $\mu\text{g/g}$ 、3.54~30.5 $\mu\text{g/g}$, Th/U 范围为 0.02~0.04, $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 表面年龄分布于 414.2~436.4 Ma(表 2,图 4)。剔除 4 个因为铅丢失导致的异常点后,将 26 个点的 $n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$ 和 $n(^{238}\text{U})/n(^{206}\text{Pb})$ 实测值投点在 Tera—Wasserburg 反向谐和图上,获得下交点年龄为 422.1 \pm 2.8 Ma(MSWD=0.65), $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 加权平均年龄为 423.1 \pm 2.8 Ma(MSWD=0.86)(图 5)。

4.2 白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素测年

本文对龙泉坪 10 号脉外侧带高纯石英伟晶岩

样品(24QL-31H3)中白云母进行⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素定年,定年结果如表 3 所示。本次白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素定年总共进行了 12 个阶段的逐步升温激光加热分析,形成了一个较为平坦的表面年龄图谱(图 6 a)。在加热的第 1、2 个阶段给出的表面年龄分别为 283.1 \pm 12.3 Ma、322.5 \pm 3.4 Ma。其后表面年龄在 3~12 阶段形成较为平坦的年龄图谱,对应的坪年龄为 330.5 \pm 3.2 Ma(MSWD=0.29)。参与计算坪年龄的³⁹Ar 的物质的量分数占比为 96.91%。在等时线图解上,构成年龄坪的数据点形成了一条相关性良好的等时线,对应等时线年龄为 330.1 \pm 3.4 Ma(MSWD=0.21),相应的截距值为 308.0 \pm 21.5,代表了初始 $n(^{40}\text{Ar})/n(^{36}\text{Ar})$ 值(图 6 b)。

4.3 白云母原位 Rb-Sr 同位素测年

本文选取龙泉坪 10 号脉外侧带高纯石英伟晶岩样品(24QL-31H2)激光片中的白云母进行原位 Rb-Sr 同位素测年,实验结果见表 4。结果显示,10 号脉伟晶岩中白云母的 $n(^{87}\text{Rb})/n(^{86}\text{Sr})$ 值变化范围为 202.5~356.7, $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值变化范围为 1.639~2.277,获得等时线年龄为 306.0 \pm 15.0 Ma(MSWD=2.8),初始 Sr 同位素组成 [$n(^{87}\text{Sr})/$

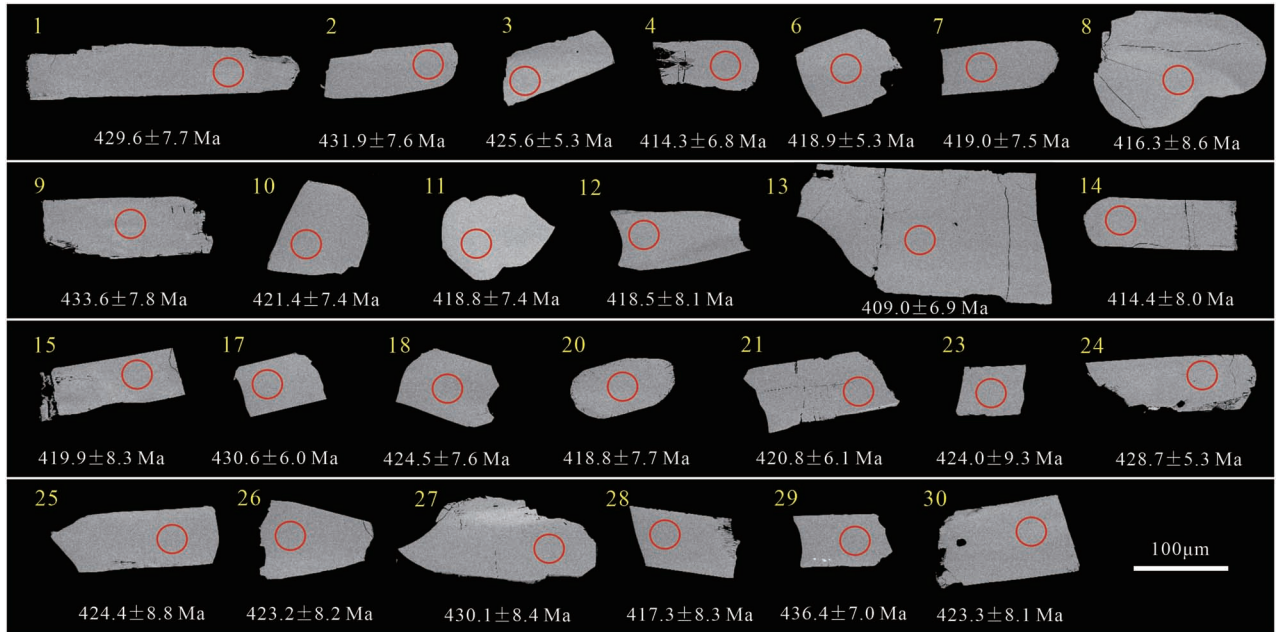


图 4 龙泉坪 10 号脉高纯石英伟晶岩铌钽铁矿背散射图像及打点位置图

Fig. 4 BSE images and analyzed spots of columbite—tanttalite from the No. 10 high-purity quartz pegmatite in the Longquanping deposit

表 2 北秦岭东部龙泉坪 10 号脉高纯石英伟晶岩铀钽铁矿 U-Pb 同位素测年数据表
 Table 2 U-Pb isotopic dating data of columbite—tantalite from the No. 10 high-purity quartz pegmatite in the Longquanping deposit, eastern North Qinling Mountains

测点号	元素含量 ($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)						谐和度 (%)
	^{238}U	^{232}Th		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$				
				测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	
1	402	8.44	0.02	0.06006	0.00076	0.5688	0.011	0.06891	0.0013	605.8	27	457.2	7.3	429.6	7.7	93.96
2	454	10.4	0.02	0.06243	0.00076	0.5929	0.011	0.06929	0.0013	688.9	26	472.7	7.1	431.9	7.6	91.37
3	487	18.0	0.04	0.05552	0.00089	0.5236	0.010	0.06824	0.0010	433.3	36	427.5	6.9	425.6	5.3	99.56
4	285	9.01	0.03	0.05654	0.00140	0.5197	0.017	0.06638	0.0011	473.5	55	425.0	11.0	414.3	6.8	97.48
6	350	7.40	0.02	0.05501	0.00110	0.5116	0.011	0.06715	0.0010	412.5	43	419.6	7.7	418.9	5.3	99.83
7	228	3.54	0.02	0.05448	0.00091	0.5043	0.013	0.06715	0.0012	391.0	38	414.6	8.5	419.0	7.5	98.94
8	379	8.98	0.02	0.05600	0.00075	0.5144	0.012	0.06671	0.0014	452.2	30	421.4	8.3	416.3	8.6	98.79
9	507	12.5	0.02	0.05529	0.00082	0.5335	0.014	0.06957	0.0013	423.8	33	434.1	9.3	433.6	7.8	99.88
10	434	9.59	0.02	0.05592	0.00068	0.5211	0.011	0.06755	0.0012	449.3	27	425.9	7.6	421.4	7.4	98.94
11	322	7.53	0.02	0.05488	0.00082	0.5080	0.011	0.06712	0.0012	407.3	34	417.1	7.7	418.8	7.4	99.59
12	348	8.82	0.03	0.05586	0.00077	0.5161	0.012	0.06708	0.0013	446.8	31	422.6	7.7	418.5	8.1	99.03
13	275	6.07	0.02	0.05531	0.00084	0.4987	0.010	0.06550	0.0011	424.8	34	410.9	7.1	409.0	6.9	99.54
14	369	8.40	0.02	0.05602	0.00079	0.5152	0.013	0.06640	0.0013	453.2	31	421.9	8.9	414.4	8.0	98.22
15	558	12.2	0.02	0.05555	0.00082	0.5175	0.014	0.06730	0.0014	434.5	33	423.5	9.0	419.9	8.3	99.15
17	431	9.70	0.02	0.06453	0.00130	0.6134	0.013	0.06908	0.0010	759.1	42	485.7	8.1	430.6	6.0	88.66
18	441	12.0	0.03	0.05471	0.00098	0.5133	0.012	0.06806	0.0013	400.5	40	420.7	8.0	424.5	7.6	99.10
20	1010	30.5	0.03	0.06108	0.00170	0.5652	0.018	0.06712	0.0013	642.0	59	454.9	12.0	418.8	7.7	92.06
21	617	15.4	0.03	0.05997	0.00170	0.5585	0.021	0.06746	0.0010	602.5	63	450.5	14.0	420.8	6.1	93.41
23	483	19.0	0.04	0.05675	0.00130	0.5301	0.017	0.06798	0.0015	482.0	52	431.9	11.0	424.0	9.3	98.17
24	234	5.97	0.03	0.05774	0.00190	0.5457	0.017	0.06877	0.0010	519.8	72	442.2	11.0	428.7	5.3	96.95
25	508	10.8	0.02	0.05461	0.00110	0.5160	0.018	0.06805	0.0015	396.3	44	422.5	12.0	424.4	8.8	99.55
26	297	6.23	0.02	0.05585	0.00091	0.5242	0.014	0.06785	0.0014	446.2	36	428.0	9.1	423.2	8.2	98.88
27	504	10.6	0.02	0.05422	0.00089	0.5141	0.012	0.0690	0.0014	380.4	37	421.2	8.4	430.1	8.4	97.89
28	219	9.36	0.04	0.05525	0.00150	0.5112	0.020	0.06688	0.0014	422.5	61	419.2	13.0	417.3	8.3	99.55
29	358	9.38	0.03	0.07165	0.00140	0.6866	0.013	0.07004	0.0012	976.1	40	530.8	7.9	436.4	7.0	82.22
30	296	7.09	0.02	0.05559	0.00078	0.5209	0.011	0.06787	0.0013	436.1	31	425.7	7.4	423.3	8.1	99.44

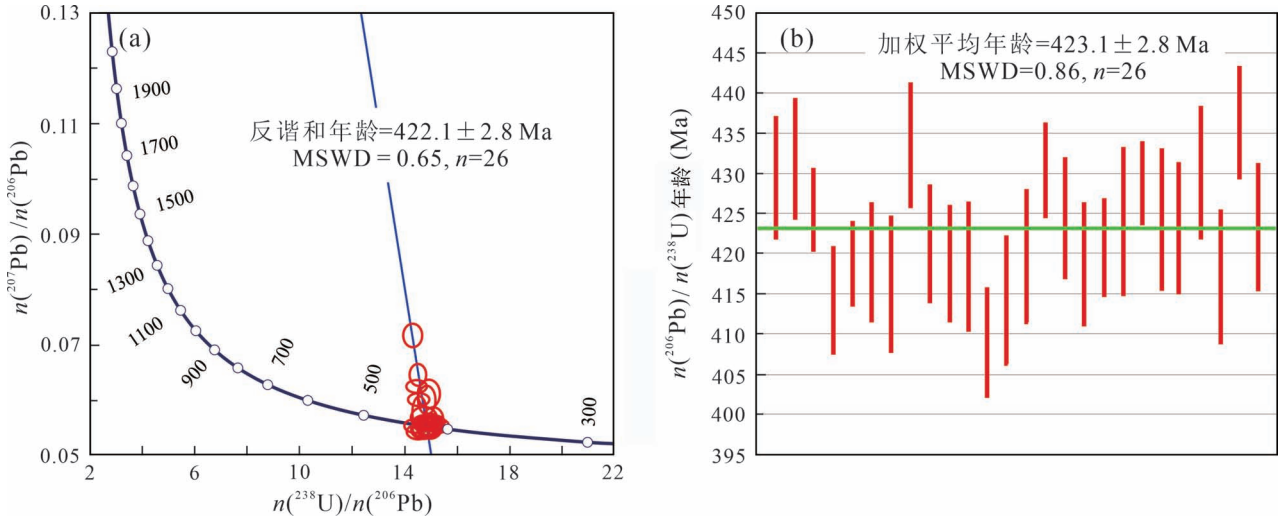


图5 龙泉坪10号脉高纯石英伟晶岩铌钽铁矿 Tera—Wasserburg 谐和图(a)和 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 加权平均年龄图(b)

Fig. 5 Tera—Wasserburg Concordia diagram (a) and $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ weighted average diagrams (b) of columbite—tantallite from the No. 10 high-purity quartz pegmatite in the Longquanping deposit

$n(^{86}\text{Sr})$]; 值为 0.802 ± 0.054 (图7)。

5 讨论

5.1 形成时代与成矿规律

岩浆岩和岩浆热液矿床常用的测年方法包括锆石、独居石、磷灰石、铌钽铁矿、锡石、石榴子石等副矿物 U-Pb 同位素定年以及云母 Ar-Ar、K-Ar、Rb-Sr 等同位素定年。其中锆石在岩浆岩中广泛发育,其 U-Pb 定年体系封闭温度最高可达 900°C , U-Pb、Hf、REE、O 扩散速率低,可容纳多种微量元素,能够记录下来岩浆的年龄、温度、氧逸度、含水量、Hf—O 同位素等地质信息,且物理化学性质稳定,可以在复杂的地质作用过程中较好地保存,是目前十分重要的同位素定年和示踪矿物。但在稀有金属伟晶岩和钨锡等高分异演化花岗岩中,锆

石常常因 U 含量太高而出现蜕晶质化现象,甚至重结晶形成曲晶石,造成年龄结果出现较大偏差(涂家润等,2025)。前人研究表明,龙泉坪高纯石英伟晶岩中的锆石 U 含量过高,蜕晶化严重(赵海波等,2024;徐进鸿等,2025),并非开展高纯石英伟晶岩成岩年代学研究的合适矿物。铌钽铁矿在稀有金属伟晶岩、碱性岩、碳酸岩中作为常见副矿物出现,同样具有 U-Pb 体系封闭温度高、U 含量高而普通 Pb 含量低的特点,能够更直接有效地获得稀有金属矿床

表3 北秦岭东部龙泉坪10号脉高纯石英伟晶岩白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素定年数据表

Table 3 ^{40}Ar - ^{39}Ar dating data of muscovite from the No. 10 high-purity quartz pegmatite in the Longquanping deposit, eastern North Qinling Mountains

温阶 ($^\circ\text{C}$)	$\left[\frac{n(^{40}\text{Ar})}{n(^{39}\text{Ar})}\right]_m$	$\left[\frac{n(^{36}\text{Ar})}{n(^{39}\text{Ar})}\right]_m$	$\left[\frac{n(^{37}\text{Ar})}{n(^{39}\text{Ar})}\right]_m$	$n(^{40}\text{Ar})$ (%)	$n(^{40}\text{Ar})$ (pmol)	$n(^{39}\text{Ar})$ (Cum.) (%)	年龄 (Ma)	
							测值	$\pm 1\sigma$
650	42.95	0.0320	0.00000	77.52	2.60	0.43	283.1	12.25
750	41.14	0.0093	0.00017	93.24	15.46	3.09	322.5	3.42
820	41.08	0.0057	0.00017	95.85	35.86	9.27	330.3	3.11
870	41.84	0.0084	0.00058	94.03	52.78	18.20	330.0	3.13
910	41.21	0.0062	0.00000	95.54	82.83	32.43	330.3	3.08
950	40.16	0.0028	0.00090	97.91	98.19	49.74	329.9	3.03
990	40.46	0.0036	0.00001	97.32	73.95	62.68	330.3	3.04
1030	41.07	0.0055	0.00083	96.02	36.29	68.94	330.8	3.08
1070	41.26	0.0065	0.00190	95.26	35.76	75.08	329.8	3.09
1130	40.71	0.0045	0.00049	96.71	68.75	87.04	330.3	3.05
1200	40.30	0.0024	0.00140	98.19	69.67	99.28	331.8	3.05
1400	52.42	0.0420	0.00000	76.03	5.36	100.0	334.0	6.13

注:表中下标的 m 代表样品中测定的同位素比值。

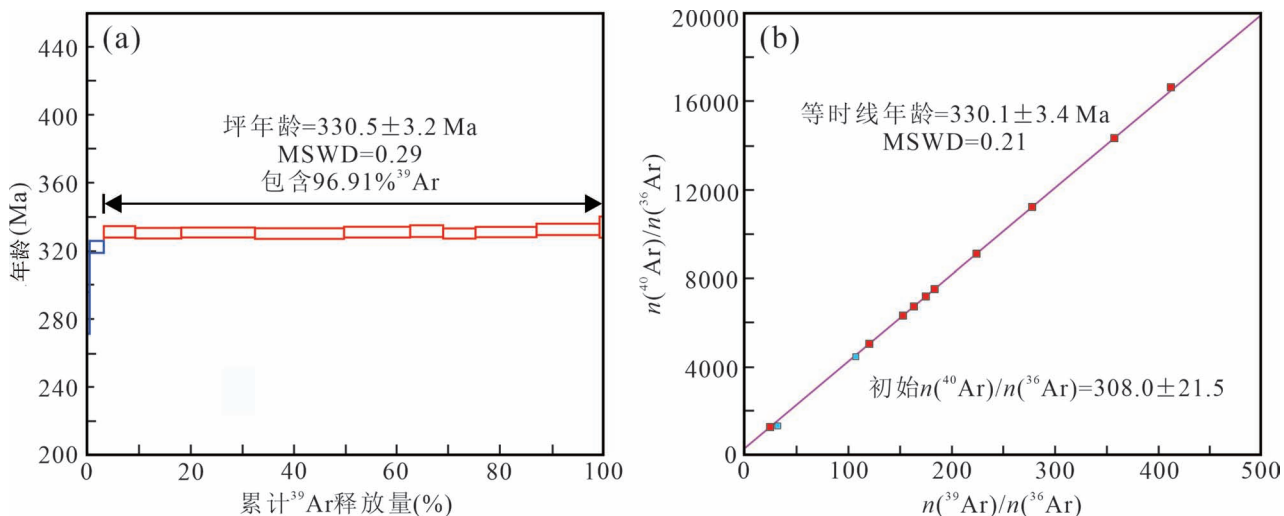


图6 龙泉坪10号脉高纯石英伟晶岩白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄和等时线年龄图

Fig. 6 ^{40}Ar - ^{39}Ar age spectrum and isochron of muscovite from the No. 10 high-purity quartz pegmatite in the Longquanping deposit

的形成时代和岩体的成岩时代,是伟晶岩等岩体开展 U-Pb 同位素测年的理想矿物。本文通过对龙泉坪10号脉高纯石英伟晶岩中岩浆成因的铌钽铁矿开展 U-Pb 同位素测年,获得 Tera—Wasserburg 反谐和年龄和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 $422.1 \pm 2.8 \text{ Ma}$ 和 $423.1 \pm 2.8 \text{ Ma}$ (图5)。由于铌钽铁矿 U-Pb 同位素年龄不易受“高 U 基体效应”和蜕晶化的影响,且反谐和图获得的下交点年龄和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加

权平均年龄在误差范围内完全一致,所以本次获得的铌钽铁矿 U-Pb 年龄最有可能代表伟晶岩岩浆的结晶年龄,即含高纯石英伟晶岩脉的形成年龄。

本次获得的龙泉坪10号脉高纯石英伟晶岩的形成时代(422.1 Ma)与前人通过独居石 U-Pb 同位素测年获得的龙泉坪5号脉的形成时代(420.2 Ma ; Zhang Yong et al., 2022)一致,早于10号脉的锆石 U-Pb 年龄(406.8 Ma ; 赵海波等, 2024),可能与锆石蜕晶化导致 U-Pb 体系发生改变有关。最近,徐进鸿等(2025)通过多种矿物 U-Pb 定年获得龙泉坪1号脉高纯石英伟晶岩脉的形成时间为 $404 \sim 398 \text{ Ma}$,表明龙泉坪地区的高纯石英伟晶岩在晚志留世—早泥盆世($420 \sim 400 \text{ Ma}$)均有成矿。通过收集前人对北秦岭地区东部伟晶岩型稀有金属矿床形成时代数据(表5),发现该区不同矿化类型的伟晶岩均形成于古生代,最早年龄为 $\sim 450 \text{ Ma}$,最晚年龄为 $\sim 370 \text{ Ma}$,成矿时间长达 70 Ma ,成矿高峰期为晚志留世—早泥盆世($430 \sim 410 \text{ Ma}$),其中 Li—Cs—Nb—Ta 等矿化主要发生于官坡密集区,如南阳山、蔡家沟、七里沟—前台、大西沟、凤凰寨等矿床,形成时代为 $450 \sim 380 \text{ Ma}$; Sn 等矿化主要发生于官坡密集区西部的火炎沟,形成时代为 $430 \sim 410 \text{ Ma}$; U 矿化主要产于栾庄密集区南部和龙泉坪密集区西部,包括光石沟、陈家庄、纸坊沟等矿床,形成于 $420 \sim 400 \text{ Ma}$; Be 矿化主要发生于龙泉坪与商南伟晶岩密集区,如黄柏沟、西山沟、大苇园等矿床,矿化时间为

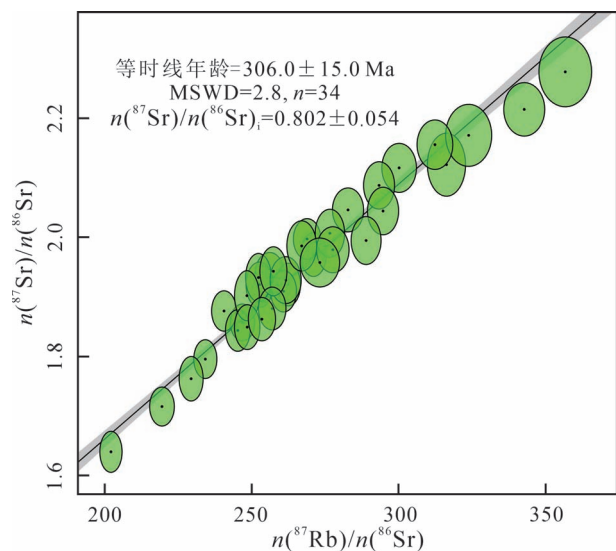


图7 龙泉坪10号脉高纯石英伟晶岩白云母原位 Rb-Sr 年龄图

Fig. 7 In-situ Rb-Sr isochron age diagram of muscovite from the No. 10 high-purity quartz pegmatite in the Longquanping

表4 北秦岭东部龙泉坪10号脉高纯石英伟晶岩白云母 Rb-Sr 同位素定年数据表

Table 4 Rb-Sr dating data of muscovite from the No. 10 high-purity quartz pegmatite in the Longquanping deposit, eastern North Qinling Mountains

测点号	$n(^{87}\text{Rb}) / n(^{86}\text{Sr})$		$n(^{87}\text{Sr}) / n(^{86}\text{Sr})$	
	测值	2σ	测值	2σ
24QL-31H2-2-1	271.2	3.5	1.971	0.030
24QL-31H2-2-2	282.9	4.3	2.046	0.030
24QL-31H2-2-3	247.1	3.3	1.857	0.025
24QL-31H2-2-4	256.3	4.0	1.937	0.030
24QL-31H2-2-5	234.5	3.2	1.795	0.026
24QL-31H2-2-7	252.9	3.7	1.920	0.031
24QL-31H2-2-8	252.5	3.5	1.932	0.033
24QL-31H2-2-9	240.8	3.4	1.876	0.027
24QL-31H2-2-12	262.7	3.3	1.920	0.029
24QL-31H2-2-13	269.0	3.7	1.997	0.028
24QL-31H2-2-14	261.0	3.5	1.909	0.028
24QL-31H2-2-15	245.5	3.4	1.843	0.028
24QL-31H2-2-16	300.3	4.7	2.116	0.033
24QL-31H2-2-17	248.6	3.4	1.902	0.034
24QL-31H2-2-18	261.8	4.2	1.928	0.032
24QL-31H2-2-19	293.5	4.2	2.087	0.032
24QL-31H2-2-20	276.8	4.0	2.006	0.032
24QL-31H2-2-21	257.6	3.7	1.943	0.033
24QL-31H2-2-22	257.2	3.8	1.880	0.029
24QL-31H2-2-23	267.2	4.1	1.985	0.034
24QL-31H2-2-25	248.7	3.5	1.849	0.030
24QL-31H2-2-27	342.8	5.6	2.214	0.036
24QL-31H2-2-28	356.7	7.2	2.277	0.047
24QL-31H2-2-29	316.4	5.2	2.122	0.043
24QL-31H2-3-1	253.7	3.7	1.862	0.029
24QL-31H2-3-2	277.8	4.4	1.979	0.031
24QL-31H2-3-3	294.8	4.3	2.044	0.032
24QL-31H2-3-4	323.9	6.3	2.171	0.042
24QL-31H2-3-5	289.1	4.1	1.994	0.032
24QL-31H2-3-6	202.5	3.0	1.639	0.028
24QL-31H2-3-7	229.7	3.3	1.762	0.030
24QL-31H2-3-8	219.8	3.4	1.715	0.026
24QL-31H2-3-9	312.4	4.9	2.155	0.033
24QL-31H2-3-10	273.4	5.4	1.957	0.033

440~390 Ma。对比发现龙泉坪地区高纯石英伟晶岩(420~400 Ma)与北秦岭地区稀有金属伟晶岩成矿高峰期(430~410 Ma)时间基本一致,表明高纯石英伟晶岩的形成可能与稀有金属伟晶岩受控于相同的地质事件和构造动力学背景。此外,根据前人的伟晶岩岩浆结晶分异成因模式,随岩浆结晶分异程度的增加,稀有金属伟晶岩常依次出现 Be 矿化、Be—Nb—Ta 矿化、Li—Be—Nb—Ta 矿化、Li—Be—Nb—Ta—Cs 的矿化分带(图 8)(Shearer et al.,

1992)。通过对比北秦岭区域内近同期形成的高纯石英伟晶岩和稀有金属伟晶岩的分布和分带特征(图 1c)发现,由南西向东北伟晶岩岩浆的分异演化程度呈现出逐渐升高的趋势,高纯石英伟晶岩应属于岩浆发生中高强度分异演化的产物,与 Be 矿化带分异演化程度比较接近,但稍低于 Be 矿化带。因此,我们认为岩浆分异演化程度可能是控制北秦岭地区伟晶岩型矿床矿化类型和分布的重要因素。

5.2 成矿地质背景

秦岭造山带是典型的大陆复合造山带,经历了新元古代—早二叠世(Pt_3 —S—C— P_1)的洋—陆板块俯冲造山、泥盆纪—中—晚三叠世(D—C— P_1 — T_{2-3})陆—陆板块俯冲碰撞造山和晚侏罗世—白垩纪(J_3 —K)陆内造山的多阶段、不同属性的复合造山过程。北秦岭构造带是秦岭造山带的主要构造单元,由新元古代初的北秦岭地块(微板块)沿洛南—栾川一线与华北板块南缘发生拼合后,又随华北板块沿其南侧与华南板块发生俯冲碰撞而形成(张国伟等,2019)。北秦岭地区古生代的构造演化与北部二郎坪洋和南部商丹洋的形成与消减密切相关(张国伟等,1995; Xue Feng et al., 1996; Ratschbacher et al., 2003; Dong Yunpeng et al., 2016)。

二郎坪洋和商丹洋的双向俯冲发生于 500~470 Ma,该事件导致北秦岭微陆块发生构造变形和深熔作用,形成以漂池岩体为代表的 S 型花岗岩,其是地壳物质部分熔融的产物(王晓霞等,2015; Kang Wenbin et al., 2022)。二郎坪洋从~500 Ma 开始向南发生俯冲,消减于北秦岭地体之下,导致北秦岭地体北部(如官坡、双槐树)高压/超高压变质岩(榴辉岩)的形成,其峰期变质年龄约为 509~480 Ma。榴辉岩中发现的柯石英、金刚石包裹体表明其经历了超高压变质,充分证明了早古生代时期存在显著的深俯冲过程(刘良等,2009)。二郎坪弧后盆地最终在~450 Ma 闭合,导致华北板块和北秦岭微陆块发生碰撞拼贴,该过程被二郎坪蛇绿混杂岩带所记录,同位素年代学数据显示其形成时间为 508~450 Ma (Dong Yunpeng et al., 2016)。450~420 Ma 期间,南部的商丹洋持续向北俯冲至北秦岭岛弧之下,引起秦岭杂岩南缘发生了(超)高压变质作用,同时北秦岭地壳继续增厚,地壳隆升,在早期高压变质相之上叠加了中压麻粒岩相退变质作用(Dong Yunpeng et al., 2016; Liu Liang et al., 2016)。俯冲板片的断离引起地幔物质上涌,形成了以灰池子岩体为代

表 5 北秦岭地区伟晶岩型矿床形成年龄统计表

Table 5 Summary of formation ages for the pegmatite-type deposits in the North Qinling Mountains

密集区	采样位置	脉体/样品编号	矿化类型	测年方法	成矿时代 (Ma)	参考文献
龙泉坪	1 号脉	23PJA-08	高纯石英	LIM 锆石 U-Pb	403±1	徐进鸿等,2025
			高纯石英	LIM 独居石 U-Pb	398±4	徐进鸿等,2025
			高纯石英	LIM 铌钽铁矿 U-Pb	403±4	徐进鸿等,2025
		23PJA-16	高纯石英	LIM 锆石 U-Pb	401±2	徐进鸿等,2025
			高纯石英	LIM 独居石 U-Pb	404±4	徐进鸿等,2025
			高纯石英	LIM 铌钽铁矿 U-Pb	404±3	徐进鸿等,2025
	5 号脉	5 号脉	高纯石英	LIM 独居石 U-Pb	420.2±2.2	Zhang Yong et al., 2022
	10 号脉	10 号脉	高纯石英	LIM 铌钽铁矿 U-Pb	422.1±2.8	本文
			高纯石英	白云母 ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	330.5±3.2	本文
			高纯石英	LIM 白云母 Rb-Sr	306.0±15.0	本文
			高纯石英	LIM 锆石 U-Pb	406.8±0.8	赵海波等,2024
	白庙沟 瓦窑沟 黄柏沟 黄柏沟 西山沟	BMG-Goltan	Be—Nb—Ta—Sn	铌钽铁矿	444.7±2.8	凤永刚等,2024
		XSG-2	Be	LIM 锆石 U-Pb	392±3.1	Zhou Qifeng et al., 2021
不详		U—Th	黑云母 K-Ar	422	成都地质学院,1973	
不详		Be	白云母 K-Ar	419	成都地质学院,1973	
不详		Be	白云母 K-Ar	368	成都地质学院,1973	
官坡	火焰沟	DDG1	Sn—Li—Ta	LIM 锡石 U-Pb	428.8±8.3	蔡文春等,2024
		HYG1	Sn—Nb—Ta	LIM 锡石 U-Pb	410.4±3.1	蔡文春等,2024
		H01	Sn—Nb—Ta	LIM 锡石 U-Pb	420.1±2.4	陈雷等,2023
		H02	Sn—Nb—Ta	LIM 锡石 U-Pb	420.6±3.2	陈雷等,2023
		LSDB-1	Li—Be—Nb—Ta—Sn	锡石 U-Pb 定年	408.1±1.5	刘新星等,2023
		LSDB-1	Li—Be—Nb—Ta—Sn	铌钽铁矿 U-Pb 定年	391.5±2.0	刘新星等,2023
		LSDB-2	Li—Be—Nb—Ta—Sn	磷灰石 U-Pb 定年	387.0±2.1	刘新星等,2023
		HYG-2	Li—Nb—Ta—Sn	LIM 铌钽铁矿 U-Pb	394±12	Zhou Qifeng et al., 2021
	HYG-Goltan	Li—Nb—Ta—Sn	LIM 铌钽铁矿 U-Pb	391.1±2.5	凤永刚等,2024	
	南阳山	302 号脉	Li—Be—Cs—Nb—Ta—Sn	LIM 铌钽铁矿 U-Pb	429.1±2.0	凤永刚等,2024
		308 号脉	Li—Be—Cs—Nb—Ta—Sn	LIM 铌钽铁矿 U-Pb	440.1±2.1	凤永刚等,2024
		309 号脉	Li—Be—Cs—Nb—Ta—Sn	LIM 铌钽铁矿 U-Pb	431.7±2.0	凤永刚等,2024
		ρ312 号脉	Li	LIM 锡石 U-Pb	420±2	曾威等,2023
		363 号脉	Li—Be—Cs—Nb—Ta	LIM 铌钽铁矿 U-Pb	387.7±4.4	Zhou Qifeng et al., 2021
		364 号脉	Li—Be—Cs—Nb—Ta—Sn	LIM 铌钽铁矿 U-Pb	383.7±6.5	Zhou Qifeng et al., 2021
		366 号脉	Li—Be—Cs—Nb—Ta—Sn	LIM 铌钽铁矿 U-Pb	397.2±4.3, 421.9±6.4	Zhou Qifeng et al., 2021
		703 号脉	Li—Be—Cs—Nb—Ta—Sn	LIM 铌钽铁矿 U-Pb	409.4 ± 5.9	Zhou Qifeng et al., 2021
		305 号脉	Li—Be—Cs—Nb—Ta	不详	410	成都地质学院,1973
	七里沟 —前台	QT-1	Li	LIM 铌钽铁矿 U-Pb	443±15, 410.7±3.9	Zhou Qifeng et al., 2021
		QT-2	Li	LIM 铌钽铁矿 U-Pb	447±4.4, 413.6±2.3	Zhou Qifeng et al., 2021
蔡家沟	14SG-1	Li—Nb—Ta—Sn	LIM 铌钽铁矿 U-Pb	415±12	Zhou Qifeng et al., 2021	
	14JCG-12	Li—Nb—Ta—Sn	LIM 铌钽铁矿 U-Pb	415.7±4.7	Zhou Qifeng et al., 2021	
大西沟	14DXG-3	Li—Nb—Ta—Sn	LIM 铌钽铁矿 U-Pb	399±5.3	Zhou Qifeng et al., 2021	
商南	凤凰寨	π15 号脉	Li—Be—Nb—Ta	LIM 铌钽铁矿 U-Pb	375±5.2	凤永刚等,2024
		π15 号脉	Li—Be—Nb—Ta	LIM 锆石 U-Pb	370.7±7	凤永刚等,2024
	光石沟	2018GSG-4-1	U	LIM 独居石 U-Pb	403.5±3.6	武勇等,2022
		2018GSG-4-3	U	LIM 独居石 U-Pb	403.5±3.6	武勇等,2022
		2018GSG-5-3	U	LIM 独居石 U-Pb	400.2±4.3	武勇等,2022
		2018GSG-5-4	U	LIM 独居石 U-Pb	399.6±0.78	武勇等,2022
		2018GSG-6-1	U	LIM 独居石 U-Pb	400.8±2.4	武勇等,2022
小花岔	不详	U	LIM 锆石 U-Pb	413.2±3.5, 415.8±3.8, 414.6±4.3	Yuan Feng et al., 2020	
大苇园	DWY-5	Be—Nb—Ta—Sn	LIM 铌钽铁矿 U-Pb	391.8±4.8	凤永刚等,2024	
栾庄	陈家庄	不详	U	晶质铀矿 U-Pb	418.4	万吉等,1992
	街子沟	不详	Be—Nb	白云母 K-Ar	406, 438, 439	成都地质学院,1973
	纸房沟	不详	Li—Be—Nb—Ta	白云母 K-Ar	372	成都地质学院,1973

注: LIM=LA-ICP-MS

表的大量侵入于秦岭群、二郎坪群和丹凤群的 I 型花岗岩,主要岩性为二长花岗岩和少量含石榴子石云母花岗岩,岩浆源区具有壳幔物质混合的特点,地化特征指示其形成于后碰撞环境(张成立等, 2013; Liu Liang et al., 2016)。在北秦岭北部的官坡和龙泉坪等地开始出现七里沟—前台、南阳山、白庙沟等稀有金属伟晶岩矿化,最老的稀有金属伟晶岩年龄为~450 Ma (Zhou Qifeng et al., 2021)。420~400 Ma,随着汇聚作用减弱,北秦岭地区由碰撞挤压环境逐渐向碰撞后伸展环境转换,在秦岭岩群发生角闪岩相退变质作用(刘良等, 2013),在北秦岭地区还发育剪切变形和雁列式张性裂隙,控制了该区岩浆岩和伟晶岩的侵位。因此这一阶段的岩浆岩表现为规模较小的岩脉或岩墙,具有高钾高分异的特征,指示这些岩体为壳源岩浆在伸展背景下发生高分异演化的产物(张成立等, 2013)。同时,稀有金属伟晶岩矿床(430~410 Ma)和高纯石英伟晶岩矿床(420~400 Ma)在此阶段大量产出,不同成分的地壳物质部分熔融可能为伟晶岩岩浆提供了成矿物质。随着~400 Ma 商丹洋的闭合,北秦岭地体与华南板块北缘(南秦岭地块)发生拼合,形成了秦岭造山带的基本格架(张成立等, 2013; 王晓霞等, 2015; Dong Yunpeng et al., 2016)。此后北秦岭地区进入板内伸展阶段,构造环境相对稳定,花岗质岩浆得以充分演化,在区域内持续形成不同类型的稀有金属伟晶岩,最晚的伟晶岩出现在商南密集区的凤凰寨 Li—Be—Nb—Ta 矿床,形成年龄为~370 Ma。

因此,伟晶岩型矿床的形成与造山带的构造演化密切相关,碰撞挤压导致地壳增厚而发生的深熔作用与陆内伸展的构造背景是伟晶岩熔体形成与就位的主要原因。龙泉坪高纯石英伟晶岩矿床可能形成于碰撞后伸展环境,与碰撞后伸展背景下加厚地壳的部分熔融有密切关系。

5.3 后期变质改造对高纯石英成矿的影响

北秦岭造山带区域上广泛存在志留纪—早泥盆世中低压麻粒岩—角闪岩相多期变质和深熔作用。Varga 等(2018)认为新元古代和早古生代秦岭群的峰期超高压榴辉岩进变质作用发生在 500~490 Ma,随后在 470~420 Ma 发生了高压麻粒岩—角闪岩相退变质作用。赵立民等(2024)提出中压麻粒岩—角闪岩相的峰期变质时代集中在 440~410 Ma,根据峡河岩群寨根岩组石榴石黑云母片岩中石榴子石边部成分限定了峰期变质温压条件为 600~650°C 和 0.62~0.75 GPa。变质峰期之后,变质作用仍然

频繁发生,但强度有逐渐减弱趋势,其持续发生的时间得到了前人诸多同位素年代学佐证(Mattauer et al., 1985; 闫全人等, 2009; Dong Yunpeng et al., 2018; Tian Zhibo et al., 2023; Bader et al., 2025)。Dong Yunpeng 等(2018)对宽坪岩群云母片岩中白云母和黑云母进行了 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年,获得的 3 个坪年龄分别为 383.1±1.2 Ma, 364.9±1.2 Ma 和 341.8±1.3 Ma,年龄 383.1±1.2 Ma 被解释为宽坪群开始抬升冷却的时间,而其后的两个年龄分别代表了宽坪群冷却至~425°C 与~300°C 以下的时间。Bader 等(2025)通过对北秦岭地区宽坪岩群、丹凤岩群、秦岭岩群、松树沟岩群开展白云母、角闪石、黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素测年,获得 18 个处于 394~323 Ma 之间的年龄数据,认为北秦岭地区从早泥盆世变质高峰期过后经历了长期逐渐冷却的过程,变质作用强度也随之降低,该观点与 Dong Yunpeng 等(2018)对商洛地区宽坪群云母片岩的研究认识一致。Tian Zhibo 等(2023)通过对红土岭和黑河地区宽坪岩群中二云母石英片岩的云母开展原位 Rb-Sr 同位素测年,获得 410 Ma, 360 Ma 和 320~300 Ma 三组变质年龄,认为宽坪岩群在 440 Ma 左右经历北秦岭地区的区域变质作用后,随后在 410~360 Ma 发生了退变质冷却和 320~300 Ma 构造热事件叠加等多期变质作用改造,该过程可能与古特提斯洋向北俯冲密切相关。此外,闫全人等(2009)测得商州板桥地区宽坪岩群中石榴子石黑云母片岩的黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 319.1±3.6 Ma,提出宽坪岩群在晚古生代经历了一次显著的构造变形变质作用。

本文对龙泉坪 10 号脉高纯石英伟晶岩中白云母进行 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 和原位 Rb-Sr 同位素测年,分别获得了 330.5±3.2 Ma 和 306.0±15.0 Ma 两组年龄,明显晚于铈钽铁矿 U-Pb 同位素获得的晚志留世成岩时代(422.1 Ma),但与前人获得的北秦岭地区 320~300 Ma 的变质事件时间一致(Tian Zhibo et al., 2023)。研究表明白云母 Ar-Ar 和 Rb-Sr 同位素体系的封闭温度分别为 350°C 和 500°C 左右(Chiaradia et al., 2014; Chew and Spikings, 2015),均低于北秦岭地区区域变质作用温度,导致伟晶岩中白云母 Ar-Ar 和 Rb-Sr 同位素体系在后期变质事件中发生了重置,从而记录了伟晶岩形成后经历的变质改造历史。因此,本文获得的白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 和原位 Rb-Sr 结果反映了高纯石英伟晶岩形成之后经历的变质改造事件。结合前人研究,我们认为龙泉坪高纯石英伟晶岩与美国 Spruce Pine、挪威

Tysfjord 等世界上典型的伟晶岩型高纯石英矿床相似,在形成之后都经受了多期不同程度的变质作用改造(绿片岩相—角闪岩相)(Swanson et al., 2010; Snook, 2014)。

前人研究表明后期变质变形作用对高纯石英杂质含量的降低具有至关重要的作用(Monecke et al., 2002; Götze et al., 2017; Zhou Haoyang et al., 2023)。变质作用通过重新分配杂质元素及调整包裹体特征,在一定条件下可降低石英中杂质含量,从而提高 SiO₂ 纯度,其纯化效果受温度、压力、流体环境及变形强度等多种因素控制。在低至中等变质条件下,变质变形与重结晶作用可使杂质元素沿位错或晶界扩散迁移,并逐渐向晶粒外部富集,导致石英晶格中杂质元素显著降低(Monecke et al., 2002; Götze et al., 2017)。但当变质温度或变形强度高时,部分杂质元素可能重新进入晶格位点或在流体作用下形成新的固溶体,使杂质元素含量升高。此外,在韧性变形或退变质阶段,石英内部产生亚颗粒化与大量位错,使原有包裹体易沿晶界或位错迁移、破裂或逸散,从而显著降低包裹体数量与体积,

随着应力的消失,变形的石英发生重结晶,重结晶形成的新石英颗粒具有更低的包裹体含量(孙丽静, 2019; 吴福元等, 2025)。目前对北秦岭地区古生代变质作用研究显示该地区在 ~450 Ma 变质峰期过后经历了降温降压的顺时针 $P-T$ 演化轨迹(Tian Zhibo et al., 2023; 赵立民等, 2024),经历了持续漫长的退变质冷却(即多期变质改造)和韧性变形,这种多期的变质变形改造作用可能为伟晶岩中石英晶体的结构重组与重结晶作用提供了有利的地质条件,这与龙泉坪 10 号伟晶岩中普遍发育的石英重结晶作用(图 3)和定向排列(图 2 d, f)等现象一致,多期变质变形过程中温度与变形的协同作用促使晶格杂质元素向外扩散、包裹体重新分布,从而使石英中杂质含量显著减少。本次获得的 330~300 Ma 变质改造时间虽然属于北秦岭地区退变质过程晚期阶段,但是也不能否认早期变质改造过程对龙泉坪高纯石英伟晶岩纯化的贡献。综合研究表明,高纯石英的形成不仅取决于伟晶岩岩浆的性质和分异演化程度,还与后期变质改造密切相关,变质改造过程中的重结晶作用和韧性变形在促进杂质迁移、降低包裹体含量方面具有关键控制作用,可能是伟晶岩型高纯石英矿床形成的重要条件。

综上所述,基于目前对伟晶岩型高纯石英矿床的成因研究,伟晶岩型高纯石英的找矿工作应在造山带中,寻找后碰撞—碰撞后伸展地质背景下岩浆发生中高强度分异演化形成的无稀有金属矿化的伟晶岩,同时应聚焦于那些经受了一定后期变质变形作用改造的伟晶岩脉,将云母和石英等矿物的变质变形、波状消光与重结晶现象作为找矿标志,以实现伟晶岩型高纯石英矿床的找矿突破。

6 结论

(1) 北秦岭龙泉坪 10 号高纯石英伟晶岩脉中铷钽铁矿 U-Pb 同位素定年结果显示其形成于晚志留世(422.1±2.8 Ma),与该区稀有金属伟晶岩成矿高峰期(430~410 Ma)时间基本一致,北秦岭地区伟晶岩型矿床的分布特征与矿化类型可能暗示伟晶岩岩浆的分异演化程度从南西向北东逐渐升高,高纯石英伟晶岩属于中高等分异演化的产物。

(2) 伟晶岩型矿床的形成与造山带的构造演化密切相关,碰撞挤压导致地壳增厚而发生的深熔作用与陆内伸展的构造背景是伟晶岩熔体形成与就位的主要原因。龙泉坪高纯石英伟晶岩矿床可能形成于碰撞后伸展环境,与碰撞后伸展背景下加厚地壳

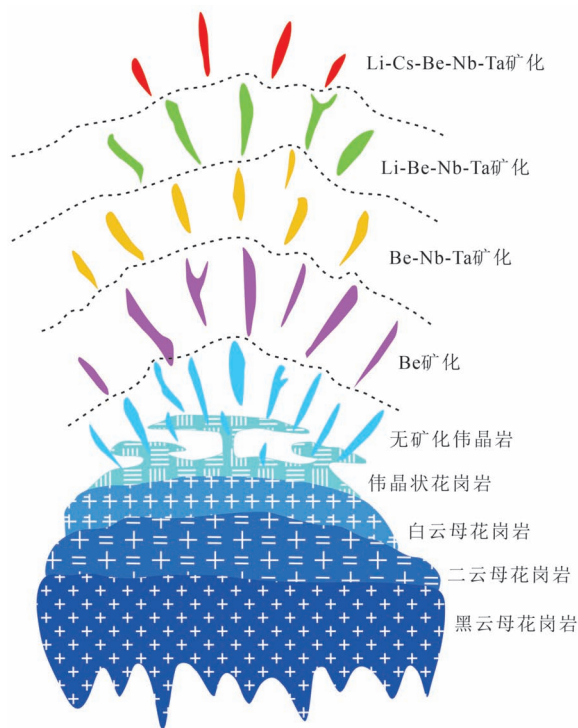


图 8 伟晶岩岩浆结晶分异成因模式图
(据 Shearer et al., 1992)

Fig. 8 Genetic model diagram of pegmatite magmatic crystallization differentiation(after Shearer et al., 1992)

的部分熔融有密切关系。

(3) 龙泉坪 10 号脉中白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 和原位 Rb-Sr 年龄分别为 330.5 ± 3.2 Ma 和 306.0 ± 15.0 Ma, 明显晚于钕钽铁矿 U-Pb 年龄(422.1 Ma), 但与前人获得的北秦岭地区 320~300 Ma 的变质事件时间一致, 反映了高纯石英伟晶岩形成后经历的变质改造历史。变质变形改造过程中的重结晶作用和韧性变形在促进杂质迁移、降低包裹体含量方面具有关键控制作用, 可能是伟晶岩型高纯石英矿床形成的重要条件。

致谢: 本文的野外地质调查和采样工作得到了中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所魏付帅工程师的帮助; 钕钽铁矿定年得到了北京燕都中实地质分析实验室有限公司张哈经理和汪欢工程师的帮助; 白云母 Ar-Ar 定年和原位 Rb-Sr 定年分别得到了中国地质科学院地质研究所张彦研究员、广州拓研分析技术有限公司杨毓波经理和初高彬工程师的帮助, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献 / References

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

- 蔡文春, 高峰, 杨宗永, 张小明, 吴应忠, 鲁麟, 王天毅, 张炳林, 姚肖博, 田科. 2024. 北秦岭高耀—官坡地区锡及稀有金属伟晶岩年代学、地球化学特征及地质意义. 地质学报, 99(4): 1274~1288.
- 陈国超, 张晓飞, 裴先治, 李佐臣, 李瑞保, 王硕, 陈孝珍, 张荣臻, 王永强. 2025. 北秦岭构造带东段官坡地区花岗伟晶岩锆石 U-Pb 年代学、岩石成因及其构造背景. 地质学报, 99(4): 1185~1208.
- 陈雷, 聂潇, 刘凯, 庞绪勇, 张英利. 2023. 东秦岭官坡地区火炎沟伟晶岩型钕钽铁矿床矿物学和年代学特征. 地学前缘(中国地质大学(北京); 北京大学), 30(5): 40~58.
- 成都地质学院第九教研室. 1973. 东秦岭东段花岗伟晶岩区的同位素质地质年龄. 地球化学, (3): 165~171.
- 董小鹏, 张国伟, 朱炳泉. 2003. 北秦岭构造属性与元古代构造演化. 地球学报, 24(1): 3~10.
- 凤永刚, 梁婷, 岑炬标, 王梦玺, 谭细娟, 高景刚, 郭腾龙, 王岩. 2024. 东秦岭稀有金属伟晶岩成矿规律. 岩石学报, 40(9): 2703~2728.
- 郭峰, 朱黎宽, 李建国, 谭秀民, 马驰, 张亮, 王红杰, 张顺新. 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.
- 贾德龙, 张万益, 陈丛林, 李永胜, 吴冬梅, 崔敏利, 张翠光. 2019. 高纯石英全球资源现状与我国发展建议. 矿产保护与利用, 39(5): 111~117.
- 焦丽香. 2019. 我国脉石英资源开发利用现状及供需分析. 中国非金属矿工业导刊, 135(2): 11~14.
- 李承东, 赵利刚, 许雅雯, 常青松, 王世炎, 许腾. 2018. 北秦岭崆坪岩群变质沉积岩年代学及地质意义. 中国地质, 45(5): 992

~1010.

- 刘丙祥. 2014. 北秦岭地体东段岩浆作用与地壳演化. 导师: 陈福坤. 合肥: 中国科学技术大学博士学位论文; 1~244.
- 刘良, 陈丹玲, 王超, 张成立. 2009. 阿尔金、柴北缘与北秦岭高压—超高压岩石年代学研究进展及其构造地质意义. 西北大学学报(自然科学版), 39(3): 472~479.
- 刘良, 廖小莹, 张成立, 陈丹玲, 官相宽, 康磊. 2013. 北秦岭高压—超高压岩石的多期变质时代及其地质意义. 岩石学报, 29(5): 1634~1656.
- 刘新星, 张娟, 李肖龙, 杨俊峰, 王猛, 王瑛雪, 张晓艳. 2023. 北秦岭卢氏龙潭沟—火炎沟钨矿床成矿作用探讨——来自花岗岩伟晶岩年代学、岩石地球化学的证据. 岩石学报, 39(5): 1484~1500.
- 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. 地质论评, 56(1): 21~30.
- 时毓, 于津海, 徐夕生, 邱检生, 陈立辉. 2009. 秦岭造山带东段秦岭岩群的年代学和地球化学研究. 岩石学报, 25(10): 2651~2670.
- 孙丽静, 赵中宝, 王根厚, 巴合达尔·巴勒塔别克, 韩宁, 赵鹏彬, 李岩, 李薇. 2019. 石英显微变形机制及流变学特征研究进展. 地质学报, 93(10): 2698~2714.
- 涂家润, 张妍, 周红英, 崔玉荣, 李国占, 吴磊, 李志丹. 2025. 钕钽铁矿 U-Pb 年代学方法研究进展. 地球科学, 50(7): 2498~2510.
- 万吉, 高立宝, 王莲香. 1992. 商丹三角地区花岗伟晶岩型铀矿成矿环境研究及远景评价. 铀矿地质, 8(5): 257~263.
- 王登红, 王岩, 陈郑辉, 黄凡, 杨刚. 2025. 试论高纯石英原料矿的找矿方向. 地球学报, 46(1): 8~14.
- 王江波, 赖绍聪, 李卫红, 胡渭平. 2015. 北秦岭东段宽坪岩体地质地球化学特征及其与铀成矿关系. 地质与勘探, 51(1): 98~107.
- 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.
- 汪灵. 2022. 高纯石英的概念及其原料品级划分. 矿产保护与利用, 42(5): 55~63.
- 王梦玺, 郭腾龙, 凤永刚, 梁婷, 周义, 孙小筠. 2022. 东秦岭构造带古生代花岗岩与赋矿花岗伟晶岩的成因联系. 矿床地质, 41(6): 1124~1141.
- 王盘喜, 朱黎宽, 刘璐, 郭俊刚, 武秋杰. 2017. 河南官坡花岗伟晶岩地质与地球化学特征. 中国地质调查, 4(6): 40~49.
- 王松山. 1983. 我国 K-Ar 法标准样⁴⁰Ar-⁴⁰K 和⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄测定及放射成因⁴⁰Ar 的析出特征. 地质科学, 18(4): 315~323.
- 王晓霞, 王涛, 张成立. 2015. 秦岭造山带花岗质岩浆作用与造山带演化. 中国科学: 地球科学, 45: 1109~1125.
- 吴福元, 刘小驰, 王佳敏, 陈厚彬, 胡方涣, 刘志超. 2025. 高分异花岗岩与高纯石英. 岩石学报, 41(10): 3243~3277.
- 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. 铀矿地质, 38(4): 698~706.
- 徐进鸿, 吴承泉, 张王伟, 李开文, 蔡志超, 李溪遥. 2025. 东秦岭龙泉坪花岗伟晶岩结构分带与高纯石英成矿关系研究: 来自矿物学、年代学和地球化学约束. 岩石学报, 41(10): 3373~3393.
- 闫全人, 王宗起, 闫臻, 王涛, 张宏远, 向忠金, 姜春发, 高联达. 2009. 从华北陆块南缘大洋扩张到北秦岭造山带板块俯冲的转换时限. 地质学报, 83(11): 1565~1583.
- 曾威, 孙丰月, 周红英, 王佳营, 李志丹, 陈军强, 毕君辉, 崔玉荣. 2023. 北秦岭官坡地区稀有金属伟晶岩锡石年代学、岩石地球化学特征及地质意义. 地球科学, 48(8): 2851~2871.

- 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. *科学通报*, 58(23): 2323~2329.
- 张国伟, 孟庆任, 赖绍聪. 1995. 秦岭造山带的结构构造. *中国科学(B辑)*, 25(9): 994~1003.
- 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. *中国科学(D辑)*, 26(3): 193~200.
- 张国伟, 董云鹏, 姚安平. 1997. 秦岭造山带基本组成与结构及其构造演化. *陕西地质*, 15(2): 1~13.
- 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 姚安平. 2019. 关于秦岭造山带. *地质力学学报*, 25(5): 746~768.
- 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. *矿产保护与利用*, 42(4): 153~158.
- 张海啟, 张宏丽, 马亚梦, 朱黎宽, 郭理想, 刘广学, 郭峰, 王守敬. 2022. 伟晶岩型高纯石英资源全链条调查评价体系的建立与实践——以北秦岭地区调查评价为例. *矿产保护与利用*, 42(5): 15~21.
- 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. *中国地质*, 51(1): 42~56.
- 赵金洲, 张驰, 张森森, 王安书, 吴承泉, 张正伟. 2022. 东秦岭花岗岩伟晶岩中高纯石英矿物的可利用性研究. *矿物岩石地球化学通报*, 41(6): 1305~1308.
- 赵立民. 2024. 北秦岭东段古生代变质作用与地球动力学机制. 导师: 李益龙. 武汉: 中国地质大学博士学位论文: 1~196.
- 周起凤, 秦克章, 唐冬梅, 马留锁. 2024. 东秦岭官坡地区稀有金属伟晶岩成矿机制. *岩石学报*, 40(9): 2729~2752.
- Anthony A P K. 2002. ArArCALC-software for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age calculations. *Computers and Geosciences*, 28: 605~619.
- Bader T, Ratschbacher L, Franz L, Romer R L, Zhang Lifei, Capitani C, Mullis J, Tichomirowa M, Li Xiaowei. 2025. Carboniferous—Triassic subduction in the Qinling orogen. *Gondwana Research*, 137: 171~208.
- Cai Wenchun, Gao Feng, Yang Zongyong, Zhang Xiaoming, Wu Yingzhong, Lu Lin, Wang Tianyi, Zhang Binglin, Yao Xiaobo, Tian Ke. 2024. Cassiterite U-Pb age, geochemistry and their geological implications of Sn—rare metal pegmatites in Gaoyao—Guanpo area, North Qinling, China. *Acta Geologica Sinica*, 98: 2~15.
- Cai Pengrui, Wang Tao, Wang Zhongqi, Li Longming, Jia Jiangliang, Wang Mingqian. 2020. Geochronology and geochemistry of Late Paleozoic volcanic rocks from eastern Inner Mongolia, NE China: Implications for igneous petrogenesis, tectonic setting, and geodynamic evolution of the south-eastern Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 362: 105480.
- Che Xudong, Wu Fuyuan, Wang Rucheng, Gerdes A, Ji Weiqiang, Zhao Zhenhua, Yang Jinhui, Zhu Zeyang. 2015. In situ U-Pb isotopic dating of columbite—tantallite by LA-ICP-MS. *Ore Geology Reviews*, 65: 979~989.
- Chen Guochao, Zhang Xiaofei, Pei Xianzhi, Li Zuochen, Li Ruibao, Wang Shuo, Chen Xiaozhen, Zhang Rongzhen, Wang Yongqiang. 2025. Zircon U-Pb geochronology, petrogenesis and tectonic setting of granitic pegmatite in Guanpo area, the eastern part of the North Qinling orogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 99: 1~34.
- Chen Lei, Nie Xiao, Liu Kai, Pang Xuyong, Zhang Yingli. 2023. Mineralogical and chronological characteristics of the Huoyangou pegmatite Sn (Nb—Ta) deposit in Guanpo, Eastern Qinling. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences (Beijing); Peking University)*, 30(5): 40~58.
- Chen Youwei, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Dong Shaohua, Xu Yue, Zhou Ting. 2018. Zircon U-Pb Ages and Sr—Nd—Hf Isotopic Characteristics of the Huichizi Granitic Complex in the North Qinling Orogenic Belt and Their Geological Significance. *Journal of Earth Science*, 29(3): 492~507.
- Chew D M, Sylvester P J, Tubrett M N. 2011. U-Pb and Th-Pb dating of apatite by LA-ICPMS. *Chemical Geology*, 280: 200~216.
- Chew D M, Petrus J A, Kamber B S. 2014. U-Pb LA-ICPMS dating using accessory mineral standards with variable common Pb. *Chemical Geology*, 363: 185~199.
- Chew D M, Spikings R A. 2015. Geochronology and Thermochronology using apatite: Time and temperature, lower crust to surface. *Elements*, 11(3): 189~194.
- Chiaradia M, Schaltegger U, Spikings R. 2014. Timescales of mineral systems—Advances in understanding over the past decade. *Society of Economic Geologists*, 18: 37~58.
- Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Zhu Bingquan. 2003. Proterozoic tectonics and evolutionary history of the North Qinling terrane. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(1): 3~10.
- Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Hauzenberger C, Neubauer F, Yang Zhao, Liu Xiaoming. 2011. Palaeozoic tectonics and evolutionary history of the Qinling orogen: Evidence from geochemistry and geochronology of ophiolite and related volcanic rocks. *Lithos*, 122(1): 39~56.
- Dong Yunpeng, Santosh M. 2016. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China. *Gondwana Research*, 29(1): 1~40.
- Dong Yunpeng, Neubauer F, Genser J, Sun Shengsi, Yang Zhao, Zhang Feifei, Cheng Bin, Liu Xiaoming, Zhang Guowei. 2018. Timing of orogenic exhumation processes of the Qinling Orogen: Evidence From $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating. *Advancing Earth and Space Science*, 37(10): 4037~4067.
- Feng Yonggang, Liang Ting, Cen Jubiao, Wang Mengxi, Tan Xijuan, Gao Jinggang, Guo Tenglong, Wang Yan. 2024. Metallogenetic regularity of rare-mental pegmatites in East Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 40(9): 2703~2728.
- Guo Feng, Zhu Likuan, Li Jianguo, Tan Xiumin, Ma Chi, Zhang Liang, Wang Hongjie, Zhang Shunxin. 2024. Biotite composition characteristics and geological significance of Longquanping pegmatitic type high purity quartz deposit in North Qinling mountains. *Mineralogy and Petrology*, 44(4): 71~82.
- Gorjovsky L, Alard O. 2020. Optimisation of laser and mass spectrometer parameters for the in situ analysis of Rb/Sr ratios by LA-ICP-MS/MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 35(10): 2322~2336.
- Götze J, Pan Yuanming, Müller A, Kotova E L, Cerin D. 2017. Trace element compositions and defect structures of high-purity quartz from the Southern Ural region, Russia. *Minerals*, 7(10): 189.
- Harben P W. 2002. The industrial minerals handbook: A guide to markets, specifications and prices. 4th Edition. Worcester Park: Industrial Minerals Information, 1~320.
- Jia Delong, Zhang Wanyi, Chen Conglin, Li Yongsheng, Wu Dongmei, Cui Minli, Zhang Cuiquan. 2019. Global resource status and China's development Suggestions of high purity quartz. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 39(5): 111~

117.

- Jiao Lixiang. 2019&. Current situation and supply demand analysis of the development and utilization of vein quartz resources in China. *China Non-metallic Mining Industry*, 135(2): 11~14.
- Kang Wenbin, Li Wei, Dong Yunpeng, Zhang Le, Zhao Jinxiang, Sheir F. 2022. Multi-stage metamorphism and deformation of the North Qinling Orogenic Belt: Constraints from petrology, geochronology, and structural analysis of the Qinling Complex. *Gondwana Research*, 105: 201~216.
- Lee J Y, Marti K, Severinghaus J P, Kawamura K, Yoo H S, Lee J B, Kim J S. 2006. A redetermination of the isotopic abundances of atmospheric Ar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(17): 4507~4512.
- Li Chengdong, Zhao Ligang, Xu Yawen, Chang Qingsong, Wang Shiyuan, Xu Teng. 2018&. Chronology of metasedimentary rocks from Kuanping Group Complex in North Qinling Belt and its geological significance. *Geology in China*, 45(5): 992~1010.
- Liu Liang, Chen Danling, Wang Chao, Zhang Chengli. 2009&. New progress on geochronology of high-pressure/ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the South Altyn Tagh the North Qaidam and the North Qinling orogenic NW China and their geological significance. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 39(3): 472~479.
- Liu Liang, Liao Xiaoying, Zhang Chengli, Chen Danling, Gong Xiangkuan, Kang Lei. 2013&. Multi-matemorphic timings of HP—UHP rocks in the North Qinling and their geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1634~1656.
- Liu Liang, Liao Xiaoying, Wang Yawei, Wang Chao, Santosh M, Yang Min, Zhang Chengli, Chen Danling. 2016. Early Paleozoic tectonic evolution of the North Qinling Orogenic Belt in Central China: Insights on continental deep subduction and multiphase exhumation. *Earth-Science Reviews*, 159: 58~81.
- Liu Xinxing, Zhang Juan, Li Xiaolong, Yang Junfeng, Wang Meng, Wang Yingxue, Zhang Xiaoyan. 2023&. Metallogeny of the Longtangou—Huoyangou Sn deposit in North Qinling Orogeny: Geochronological and petrogeochemical evidence from Sn-bearing granite—pegmatite. *Acta Petrologica Sinica*, 39(5): 1484~1500.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, Gunther D, Xu Juan, Gao Changgui, Chen Haihong. 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): 34~43.
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong Keqin, Wang Dongbin. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt—peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1): 537~571.
- Lu Xinxiang, Zhu Zhaohui, Gu Demin, Zhang Huamian, Wu Mei, Wu Yan. 2010&. The main geological and metallogenic characteristics of granitic pegmatite in Eastern Qinling Belt. *Geological Review*, 56(1): 21~30.
- Luan Shiwei. 1984. Somegeochemical characteristics of a RE-bearing granitic pegmatite in the Eastern Qinling Range. *Geochemistry*, 8(4): 334~341.
- Mattauer M, Ph. Matte, Malavieille J, Tapponnier P, Maluski H, Xu Zhiqin, Lu Yilun, Tang Yaoqin. 1985. Tectonics of the Qinling belt: build-up and evolution of eastern Asia. *Nature*, 317: 496~500.
- Melcher F, Graupner T, Gabler H E, Sitnikova M, Henjes-Kunst F, Oberthir T, Gerdes A, Dewaele S. 2015. Tantalum—(niobium—tin) mineralisation in African pegmatites and rare metal granites: Constraints from Ta—Nb oxide mineralogy, geochemistry and U-Pb geochronology. *Ore Geology Reviews*, 64: 667~719.
- Monecke T, Kempe U, Götze J. 2002. Genetic significance of the trace element content in metamorphic and hydrothermal quartz: A reconnaissance study. *Earth and Planetary Science Letters*, 202(3): 709~724.
- Müller A, Wanvik J E, Ihlen P M. 2012. Petrological and chemical characterization of high purity quartz deposits with examples from Norway. In: Götze J and Mckel R (Eds.). *Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 71~118.
- Qin Zhengwei, Wu Yuanbao, Siebel W, Gao Shan, Wang Hao, Abdallsamed M I M, Zhang Wenxiang, Yang Saihong. 2015. Genesis of adakitic granitoids by partial melting of thickened lower crust and its implications for early crustal growth: A case study from the Huichizi pluton, Qinling orogen, central China. *Lithos*, 238: 1~12.
- Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A, Webb L E, Grimmer J C, McWilliams M O, Ireland T. 2003. Tectonics of the Qinling (Central China): tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history. *Tectonophysics*, 366(1), 1~53.
- Shearer C K, Papike J J, Jolliff B L. 1992. Petrogenetic links among granites and pegmatites in the Harney Peak rare-element granite—pegmatite system, Black Hills, South Dakota. *Canadian Mineralogist*, 30: 785~809.
- Shi Yu, Yu Jinhai, Xu Xisheng, Qiu Jiansheng, Chen Lihui. 2009&. Geochronology and geochemistry of the Qinling Group in the eastern Qinling Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2651~2670.
- Snook B R. 2014. Towards exploration tools for high purity quartz: an example from the South Norwegian Evje—Iveland pegmatite belt. University of Exeter (United Kingdom), 2014.
- Steiger R H, Jager E. 1977. Subcommittee on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 36(3): 359~362.
- Swanson S E, Veal W B. 2010. Mineralogy and petrogenesis of pegmatites in the Spruce Pine district, north Carolina, USA. *Journal of Geosciences*, 55(1): 27~42.
- Tian Zhibo, Gou Longlong, Liu Xuefeng, Zhou Feng. 2023. Metamorphic P—T conditions, in-situ LA-ICP-MS biotite—muscovite Rb-Sr geochronology and tectonic implications of two-mica quartz schist from the Kuanping Group in the North Qinling Orogenic Belt. *Geological Journal*, 59: 46~64.
- Tu Jiarun, Zhang Yan, Zhou Hongying, Cui Yurong, Li Guozhan, Wu Lei, Li Zhidan. 2025&. Progress in U - Pb dating methods of columbite - tantalite minerals. *Earth Science*, 50(7): 2498~2510.
- Varga J, Kelsey D E, Dong Yunpeng, Raimondo T, Hand M. 2018. Pressure—temperature—time (P—T—t) evolution of fore-arc and foreland schist in the Qinling Orogenic Belt, China: Implications for Late Paleozoic and Triassic subduction termination. *Gondwana Research*, 61: 20~45.
- Wan Ji, Gao Libao, Wang Lianxiang. 1992&. Metallogenic environmental study and prospect assessment of the granite—pegmatite-type uranium in Shangxian—Danfeng triangle area, Shaanxi. *Uranium Geology*, 8(5): 257~263.
- Wang Chengyuan, Alard O, Lai Yijun, Foley S F, Liu Yongsheng,

- Munnikhuis J, Wang Yu. 2022. Advances in in-situ Rb-Sr dating using LA-ICP-MS/MS: Applications to igneous rocks of all ages and to the identification of unrecognized metamorphic events. *Chemical Geology*, 610: 121073.
- Wang Jiangbo, Lai Shaocong, Li Weihong, Hu Weiping. 2015&. Geological and geochemical characteristics of the Kuaping granite in the eastern section of North Qinling and their relationship with uranium mineralization. *Geology and Exploration*, 51(1): 98~107.
- Wang Ling. 2019&. Industrial types and application characteristics of quartz ore deposits. Conservation and utilization of mineral resources, 39(6): 39~47.
- Wang Ling. 2022&. Concept of high purity quartz and classification of its raw materials. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 42(5): 55~63.
- Wang Mengxi, Guo Tenglong, Feng Yonggang, Liang Ting, Zhou Yi, Sun Xiaoyun. 2022&. Genetic link of Paleozoic granites and mineralized granitic pegmatites in East Qinling tectonic belt. *Mineral Deposits*, 41(6): 1124~1141.
- Wang Panxi, Zhu Likuan, Liu Lu, Guo Jungang, Wu Qiuji. 2017&. Geological and geochemical characteristics of granitic pegmatite in Guanpo, Henan Province. *Geological Survey of China*, 4(6): 40~49.
- Wang Songshan. 1983&. Age determinations of ^{40}Ar - ^{40}K , ^{40}Ar - ^{39}Ar and radiogenic ^{40}Ar released characteristics on K-Ar geostandards of China. *Chinese Journal of Geology*, 18(4): 315~323.
- Wang Tao, Wang Xiaoxia, Tian Wei, Zhang Chengli, Li Wuping, Li Shan. 2009. North Qinling Paleozoic granite associations and their variation in space and time: Implications for orogenic processes in the orogens of central China. *Science in China (Series D)*, 52: 1359~1384.
- Wang Xiaoya, Wang Tao, Zhang Chengli. 2015&. Granitoid magmatism in the Qinling orogen, central China and its bearing on orogenic evolution. *Science China; Earth Sciences*, 58: 1497~1512.
- Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Wang Jiamin, Chen Houbin, Hu Fangyang, Liu Zhichao. 2025&. Highly fractionated granite and high-purity quartz. *Acta Petrologica Sinica*, 41(10): 3243~3277.
- 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. *Uranium Geology*, 38(4): 698~706.
- Xu Jinhong, Wu Chengquan, Zhang Zhengwei, Li Kaiwen, Cai Zhichao, Li Xiyao. 2025&. Structural zoning and high purity quartz of granitic pegmatite from the Longquanping area in the East Qinling: Constraints from mineralogy, chronology, and geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 41(10): 3373~3393.
- Xue Feng, Lerch M F, Kroner A, Reischmann T. 1996. Tectonic evolution of the East Qinling Mountains, China, in the Palaeozoic: a review and new tectonic model. *Tectonophysics*, 253: 271~284.
- Yan Quanren, Wang Zongqi, Yan Zhen, Wang Tao, Zhang Hongyuan, Xang Zhongjin, Jiang Chunfa, Gao Lianda. 2009&. Timing of the transformation from seafloor spreading on the south margin of the North China Block to subduction within the North Qinling Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1565~1583.
- Yang Zhaoyu, Wang Rucheng, Che Xudong, Xie Lei, Hu Huan. 2022. Paragenesis of Li minerals in the Nanyangshan rare-metal pegmatite, Northern China: Toward a generalized sequence of Li crystallization in Li—Cs—Ta-type granitic pegmatites. *American Mineralogist*, 107: 2155~2166.
- Yuan Feng, Jiang Shaoyong, Liu Jianjun, Liu Gang, Zhang Shuai, Sha Yazhou. 2020. Origin and evolution of uraniferous pegmatite: A case study from the Xiaohuacha granite—pegmatite system and related country rocks in the Shangdan uranium mineralization district of North Qinling Orogenic Belt. *China. Lithos*, 356: 105379.
- Yuan Feng, Jiang Shaoyong, Wang Chunlong, Jin Ge, Zhang Jie, Zhang Haoxiang, Hu Xiaojia. 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. *Ore Geology Reviews*, 140: 104634.
- Zeng Wei, Sun Fengyue, Zhou Hongying, Wang Jiaying, Li Zhidan, Chen Junqiang, Bi Junhui, Cui Yurong. 2023&. Cassiterite U - Pb age, geochemistry and their geological significances of rare metal pegmatites in Guanpo area, North Qinling, China. *Earth Science*, 48(8): 2851~2871.
- Zhang Guowei, Dong Yunpeng, Yao Anping. 1997&. The crustal compositions, structures and tectonic evolution of the Qinling Orogenic belt. *Geology of Shaanxi*, 15(2): 1~13.
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Dong Yunpeng, Yao Anping. 2019&. Rethinking of the Qinling Rogen. *Journal of Geomechanics*, 25(5): 746~768.
- 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. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 42(4): 153~158.
- Zhang Haiqi, Zhang Hongli, Ma Yameng, Zhu Likuan, Guo Lixiang, Liu Guangxue, Guo Feng, Wang Shoujing. 2022&. Establishment and practice of a whole chain survey and evaluation system for pegmatite-type high purity quartz resources: A case study in North Qinling Region, China. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 42(5): 15~21.
- Zhang Yong, Zhao Haibo, Liu Lei, Pan Jiayong, Zhu Likuan, Liu Guoqi, Zhang Xiaotian. 2022. 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. *Acta Geochimica*, 41(2): 197~207.
- 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. *Geology in China*, 51(1): 42~56.
- Zhou Haoyang, Müller A, Berndt J. 2023. Quartz chemistry finger prints melt evolution and metamorphic modifications in high-purity quartz deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 356: 179~195.
- Zhou Qifeng, Qin Kezhang, Tang Dongmei. 2021. Mineralogy of columbite-group minerals from the rare-element pegmatite dykes in the East-Qinling orogen, central China: Implications for formation times and ore genesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 218: 104879.
- Zhou Qifeng, Qin Kezhang, Tang Dongmei, Ma Liusuo. 2024&. Metallogenic mechanism of the rare-element pegmatite dykes in Guanpo area from the East Qinling Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 40(9): 2729~2752.

Isotopic dating of columbite—tantalite and muscovite from pegmatite-type high-purity quartz deposit in North Qinling Mountains and geological implications

—Case study of the No. 10 Vein in Longquanping Deposit

JIA Long¹⁾, FAN Xianke¹⁾, ZHANG Haiqi^{2, 3)}, ZHU Likuan²⁾, WANG Hongjie²⁾,
TIAN Mingjun^{4, 5)}, YU Deshui²⁾, WANG Shoujing²⁾

1) *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;*

2) *Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, Zhengzhou, 450006;*

3) *China Geological Survey, Beijing, 100037;*

4) *Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy Technology Group, Beijing, 100160;*

5) *State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing, 102628*

Objectives: High-purity quartz ore, as a new mineral species, serves as an important raw material for the development of modern high-tech industries. The discovery of the Longquanping high-purity quartz deposit in the North Qinling belt represents a significant breakthrough in China's exploration of pegmatite-type high-purity quartz deposits, but its genetic mechanism remains unclear.

Methods: Based on detailed studies of ore deposit geological characteristics and petrography, columbite—tantalite and muscovite from the No. 10 high-purity quartz pegmatite in the Longquanping deposit were selected to carry out in-situ U-Pb, Rb-Sr, and ⁴⁰Ar-³⁹Ar isotope geochronological research, aiming to constrain the formation age, metallogenic geological setting, and post-ore metamorphic modification history of the high-purity quartz deposit.

Results: The results show that the U-Pb age of columbite—tantalite from the No. 10 pegmatite vein at the Longquanping deposit is 422.1 ± 2.8 Ma, which is essentially consistent with the peak mineralization period (430~410 Ma) of rare-metal pegmatites in the region. These pegmatites were likely formed in a post-collisional extensional setting. The ⁴⁰Ar-³⁹Ar and in-situ Rb-Sr ages of muscovite are 330.5 ± 3.2 Ma and 306.0 ± 15.0 Ma, respectively, which are significantly later than the columbite—tantalite U-Pb age (422.1 Ma) but consistent with the previously reported metamorphic thermal event of 320~300 Ma in the North Qinling region. This indicates that the ⁴⁰Ar-³⁹Ar and Rb-Sr isotopic systems in the pegmatite were reset during a later metamorphic event, thereby recording the metamorphic modification history experienced by the high-purity quartz pegmatite after its formation.

Conclusions: Combined with petrographic characteristics of quartz, it is demonstrated that the Longquanping high-purity quartz pegmatite vein is similar to the pegmatite-type high-purity quartz deposits in the world, such as the Spruce Pine deposit in the United States and the Tysfjord deposit in Norway. After the formation of pegmatites, these deposits underwent multiple stages of metamorphic modification, leading to deformation and dynamic recrystallization of quartz, which facilitated the formation of high-purity quartz. Therefore, post-formation metamorphic modification may be a critical factor for the formation of pegmatite-type high-purity quartz deposits.

Keywords: columbite—tantalite U-Pb age; muscovite Rb-Sr age; muscovite ⁴⁰Ar-³⁹Ar age; high-purity quartz; pegmatite; Longquanping deposit; North Qinling Mountains

Acknowledgements: This study was supported by: the National Key Research and Development Program of China: “Metallogenic Mechanism and Key Purification Technologies of High-Purity Quartz Raw Material Deposits” (No. 2024YFC2910101); the National Natural Science Foundation of China—Geological Survey Joint Fund: “Study on the Formation Mechanism and Impurity Occurrence of Pegmatite-Hosted High-Purity Quartz in the

Eastern North Qinling” (No. U2344206); the Geological Survey Project of China Geological Survey: “Investigation on Metallogenic Geological Setting of Pegmatite-Type High-Purity Quartz Deposits in the North Qinling and Altai Regions” (No. DD20250208807); and the “Unveiling and Leading” Research Fund Project of Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy Technology Group (No. JTKY202427822)

First author: JIA Long, male, born in 2001, master’s candidate, majoring in Mineralogy, Petrology, and Economic Geology; Email: sterling008@163.com

Corresponding Author: FAN Xianke, male, born in 1986, associate researcher, postgraduate tutor, is mainly engaged in the metallogenesis of tungsten—tin and high-purity quartz deposits; Email: fanxianke009@163.com

Manuscript received on: 2025-10-21; Accepted on: 2026-01-08; Published online on: 2026-01-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2026.01.065

Edited by: ZHANG Yuxu

