

doi: 10.12029/gc20240203001

漆群佳, 孙涛, 殷顺媛, 夏自辛, 马致远, 李泽珊. 2025. 滇东南瓦渣 W-Be 矿床中含铍伟晶岩成因研究[J]. 中国地质, 52(3): 1002–1021.

Qi Qunjia, Sun Tao, Yin Shunyuan, Xia Zixin, Ma Zhiyuan, Li Zeshan. 2025. Genesis of the beryllium-bearing pegmatite in Wazha W-Be deposit, Southeastern Yunnan[J]. Geology in China, 52(3): 1002–1021(in Chinese with English abstract).

滇东南瓦渣 W-Be 矿床中含铍伟晶岩成因研究

漆群佳¹, 孙涛^{2,3,4,5}, 殷顺媛⁶, 夏自辛², 马致远², 李泽珊²

(1. 云南省红河哈尼族彝族自治州自然资源和规划局, 云南 红河 661100; 2. 云南省高校关键矿产成矿学重点实验室, 云南大学地球科学学院, 云南 昆明 650500; 3. 云南省中老孟缅自然资源遥感监测国际联合实验室, 云南 昆明 650500; 4. 中国地质学会热液型金铜多金属矿成矿规律与有效勘查技术创新基地, 云南 昆明 650500; 5. 云南省三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 云南 昆明 650500; 6. 云南省地质矿产勘查院, 云南 昆明 650051)

摘要:【研究目的】铍属于稀有金属, 在国民经济建设以及国防科技等领域都发挥着不可替代的作用。瓦渣钨铍矿床位于滇东南老君山花岗岩体东北接触带, 矿区主要出露老君山岩体二云母花岗岩、古元古代南秧田岩组第二段云母片岩、片麻岩和伟晶岩脉; 铍矿化均发生在伟晶岩脉中, 具明显分带性; 探讨含铍伟晶岩的成因, 对区域钨铍矿床成因研究以及铍矿找矿勘查都具有重要意义。【研究方法】本文通过对含铍伟晶岩脉开展 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、全岩主微量元素、Sr-Nd 同位素和绿柱石包裹体研究, 探讨含铍伟晶岩成因。【研究结果】含铍伟晶岩脉形成年龄为 $(187.9 \pm 1.4)\text{Ma}$, 岩脉具有高硅、富铝、富碱特征; 轻稀土相对富集、重稀土相对亏损; 富集 Rb、Th、U、Ta 等大离子亲石元素, 亏损 Ba、Nd、Sm、Ti 等高场强元素; 伟晶岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.702740 \sim 0.732013$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i = 0.512017 \sim 0.512039$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -10.3 \sim -10.6$, 显示伟晶岩具有富集特征。【结论】伟晶岩成矿流体为中温、中盐度的 $\text{NaCl-H}_2\text{O-CO}_2\text{-CH}_4\text{-N}_2$ 体系, 形成于陆壳物质部分熔融, 在成矿过程中发生过流体不混溶作用。

关键词: 锆石年代学; 流体不混溶作用; 含铍伟晶岩成因; 瓦渣 W-Be 矿床; 滇东南; 矿产勘查工程

创 新 点: 厘定了滇东南瓦渣钨铍矿床中含铍伟晶岩的形成时代和地球化学特征, 对伟晶岩中包裹体开展了详细研究, 探讨了瓦渣含铍伟晶岩的成因。

中图分类号: P618.67; P618.72 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)03-1002-20

Genesis of the beryllium-bearing pegmatite in Wazha W-Be deposit, Southeastern Yunnan

QI Qunjia¹, SUN Tao^{2,3,4,5}, YIN Shunyuan⁶, XIA Zixin², MA Zhiyuan², LI Zeshan²

(1. Bureau of Natural Resources and Planning, Hani-Yi Autonomous Prefecture of Honghe, Yunnan Province, Honghe 661100, Yunnan, China; 2. Key Laboratory of Critical Minerals Metallogeny in University of Yunnan Province, College of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China; 3. Yunnan International Joint Laboratory of China-Laos-Bangladesh-Myanmar Natural Resources Remote Sensing Monitoring, Kunming 650500, Yunnan, China; 4. Innovation Base for Metallogenic Regularity and Effective Exploration Technology of Hydrothermal Gold-Copper Polymetallic Deposits, Geological Society of China, Kunming 650500, Yunnan, China; 5. Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization of Yunnan

收稿日期: 2024-02-03; 改回日期: 2024-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41862005)、云南省基础研究计划项目(202401AS070124、202301AT070116)、云南省新一轮找矿行动暨地勘基金项目(Y202406)联合资助。

作者简介: 漆群佳, 女, 1997 年生, 硕士, 从事矿产研究及资源开发规划; E-mail: 1768724056@qq.com。

通信作者: 孙涛, 男, 1983 年生, 教授, 从事关键矿产成矿规律研究; E-mail: suntao06@126.com。

Province, Kunming 650500, Yunnan, China; 6. Yunnan Institute of Geology & Mineral Resources Exploration, Kunming 650051, Yunnan, China)

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

[Objective] Beryllium is a rare metal element, which plays an irreplaceable role in national economic construction and national defense science and technology. The Wazha W-Be deposit is located in the northeastern part of the Laojunshan granite. The two-mica granites of the Laojunshan complex, mica schist and gneiss in the second section of the Paleoproterozoic Nanyangtian Formation, and pegmatite veins are mainly exposed. The beryllium mineralization occurs in pegmatite veins which with obvious zoning. Discussion on the genesis of beryllium-bearing pegmatites is of great significance to the study on the genesis of regional tungsten-beryllium deposits and the exploration of beryllium minerals. **[Methods]** In this paper, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, whole-rock major and trace elements, Sr-Nd isotopes and inclusions in beryl were studied to discuss the genesis of beryllium-bearing pegmatite. **[Results]** The formation age of beryllium-bearing pegmatite veins in the mining area is (187.9 ± 1.4) Ma, and the veins are characterized by high silicon, rich aluminum and rich alkali. The light rare earth elements are relatively enriched, while the heavy rare earth elements are depleted. The samples enriched in Rb, Th, U, Ta, etc, depleted in Ba, Nd, Sm and Ti. The initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios and $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ of the Wazha pegmatite are from 0.702740 to 0.732013 and from -10.3 to -10.6, respectively. **[Conclusions]** The pegmatites formed by partial melting of continental crust, with mineralization involving a medium-temperature, moderate-salinity $\text{NaCl-H}_2\text{O-CO}_2\text{-CH}_4\pm\text{N}_2$. Fluid immiscibility occurred in the pegmatite during the mineralization process.

Key words: zircon U-Pb ages; fluid immiscibility; genesis of the pegmatite veins; Wazha W-Be deposit; Southeast Yunnan; mineral exploration engineering

Highlights: This paper determined the age and geochemistry characteristics of the beryllium-bearing pegmatites in the Wazha W-Be deposit, southeastern Yunnan Province, China, and studied on the inclusions in pegmatite and discussed the genesis of beryllium-bearing pegmatite.

About the first author: QI Qunjia, female, born in 1997, master, mainly engaged in mineral resource research and development planning; E-mail: 1768724056@qq.com.

About the corresponding author: SUN Tao, male, born in 1983, professor, mainly engaged in magmatic deposit research; E-mail: suntao06@126.com.

Fund support: Supported by National Science Foundation of China (No.41862005), Yunnan Fundamental Research Projects (No.202401AS070124, No.202301AT070116) and the New Round of Prospecting Operation and Geological Prospecting Fund Project in Yunnan Province (No.Y202406).

1 引言

铍属于稀有金属,因具有特殊的物理化学性质,在国民经济建设以及国防科技等领域都发挥着不可替代的作用。近年来,随着高新技术产业的蓬勃发展和铍矿资源需求的增长,铍矿床地位不容小觑,其在国防军工及国家战略资源储备等方面尤为重要。伟晶岩型铍矿床是指含铍矿物富集在伟晶岩中,是重要的铍矿床类型之一。前人对伟晶岩型铍矿开展了大量的研究,取得了丰富的成果。尤其在铍矿的形成与演化(Schilling et al., 2015)、成矿物质特征(Lyalina et al., 2018)、成矿物质来源(Maas

et al., 2015; Ripp et al., 2020)、成矿演化规律(Grew and Hazen, 2014)、矿物学、岩石学、地球化学(Grew, 2002)、含铍矿床的物理化学性质(Kol'tsov, 2017)、铍矿床分类(Barton and Young, 2002)、铍的提取及荧光测定方法(Agrawal et al., 2008)、花岗伟晶岩含铍矿物学特征、铍矿化及矿化带与花岗岩类岩石的成因联系等方面进行了大量研究(Cerný, 2002; Malyukova et al., 2005; Bulnaev, 2006; Daminova et al., 2015; Schilling et al., 2015; Hanson and Zito, 2019)。近年来,国内学者在含铍伟晶岩年代学、地球化学、成因机制、地质意义、物理化学条件、流体包裹体、分析技术、与高分异花岗岩成因

关系以及铍矿床分类等方面的研究也取得了较大的进展(吴长年等, 1995; 李建康等, 2013, 2017; 李再会等, 2014; 王登红等, 2014; 黄文清, 2017; 张振发等, 2018; 徐兴旺等, 2020; 吴润秋等, 2020; 张传昱等, 2021; 徐喆等, 2024)。例如: 在挪威的 Høgtuva 铍矿床中, 研究人员发现变质花岗岩内存在几种空间上受限的铍矿物, 其中硅铍石是最主要的矿石矿物。为了探究这些含铍矿物在变质花岗岩和伟晶岩中的结晶过程, 研究者以硅铍石为研究对象, 通过对矿物进行定性和定量分析, 认为尽管存在富氟矿物, 但铍在变质过程中并未发生显著变化, 而是硅铍石经历了原位变质反应(Schilling et al., 2015)。铍矿物的形成还可能受到碱度变化的影响。以俄罗斯西北部科拉半岛的铍矿床为例, 该地区的铍成矿与碱性岩和长英质岩紧密相关。这些岩石在岩石学、地球化学、矿物学特征和成矿时代上均存在显著差异, 特别是在 Lovozero 和 Khibiny 碱性地块晚期形成的伟晶岩和热液脉中, 丰富的铍矿物种类也受到了碱度变化的影响(Ripp et al., 2020)。此外, 对埃马科夫卡矿床的研究表明, 富铍矿体产于花岗岩地块外, 而正长岩(含稀土元素矿化)则产于花岗岩地块内, 研究还揭示了流体来源主要是正长岩而非花岗岩, 且花岗岩和层状伟晶岩中不存在铍矿化, 流体相组成也存在明显差异。

综上所述, 铍矿化与岩浆作用和变质作用均密切相关。然而, 要确定哪种作用对铍的矿化贡献更大, 仍需要针对不同矿床进行具体分析。这些研究不仅有助于深入理解铍矿的形成机制, 还可以为未来铍矿勘探和开发提供了重要参考。研究表明, 我国铍资源的禀赋条件并不理想, 这意味着未来供应增长的潜力相对有限, 难以满足日益增长的需求。在高端铍产品技术领域, 我们面临着明显的短板, 严重依赖进口。全球铍资源的供应链和产业链呈现出高度的垄断特征, 这无疑增加了安全风险。考虑到现阶段及未来的产量远远不能满足国内需求, 我国对外部供应的依赖度较高。因此, 需要采取有效的措施来加强铍资源的开发利用, 提高自主创新能力, 降低对外依存度, 以确保我国铍产业的可持续发展(李娜等, 2019; 陈子瞻等, 2023)。

瓦渣铍矿床地处云南省文山市麻栗坡县城 197°方向, 老君山花岗岩体的东北接触带, 为滇东

南—桂西白垩纪钨—锡多金属成矿区的一部分(图 1)。前人仅对该区的花岗岩体进行了年代学、地球化学、成因等相关研究, 对伟晶岩型铍矿床的相关研究几乎处于空白状态。本文选择瓦渣矿区的含铍伟晶岩为研究对象, 对伟晶岩开展锆石 U-Pb 定年、主微量元素、Sr-Nd 同位素测试, 并对绿柱石中包裹体进行了详细研究, 分析瓦渣地区含铍伟晶岩与花岗岩的关系, 探讨伟晶岩的成因, 对区域钨铍矿床成因以及找矿勘查都具有重要意义。

2 矿床及含铍伟晶岩地质特征

滇东南老君山地区位于云南省东南部越北地块、扬子地块交汇处, 古特提斯构造域和环太平洋构造域的复合部位, 属于华南褶皱系西南隅的滇东南凹陷褶皱带(图 1, 张世涛等, 1999; 李东旭和许顺山, 2000)。区域构造演化复杂, 经历过多期构造—岩浆—热液事件及其成矿作用, 强烈的加里东期和燕山期岩浆活动为 W、Sn、Be 等多种稀有金属矿产的形成提供了物质来源和有利成矿条件。此外, 老君山地区还存在小规模印支期成矿作用(张振发等, 2018)。区域岩浆活动频繁, 具有多期次、多阶段、分布范围广的特点; 岩性以酸性岩为主, 并含少量变质基性岩。区域岩浆岩以老君山多阶段复式花岗岩体为主体, 根据成岩时代早晚可划分为: 南捞片麻状花岗岩(~430 Ma)、团田片麻状花岗岩(434~438 Ma)、老城坡片麻状花岗岩(426~427 Ma)、南温河花岗岩(405~444 Ma)和都龙花岗岩体(~80 Ma)(徐伟, 2007; 徐斌, 2015; 潘锦波等, 2015)。

瓦渣矿区内岩浆岩仅出露都龙花岗岩体($\gamma_5^{3(a)}$), 位于矿区西部, 近南北走向, 为燕山早期的第一亚期酸性侵入岩, 与古元古代南秧田岩组接触线呈“S”形弧线(图 2)。矿区内以浅灰色至灰白色二云母花岗岩为主, 成不规则环状分布, 细至中粗粒, 具斑状结构, 出露面积约占岩体的三分之二^①。区内钾长石与斜长石共生, 粒径通常处于 5~20 mm。花岗岩的主要矿物成分为钠长石、斜长石、白云母、黑云母和石英等。

瓦渣地区分布有多条伟晶岩脉, 单条伟晶岩脉体地表出露规模较小, 一般宽约 2 m, 长 30~100 m, 部分伟晶岩出现了铍矿化(图 2); 含铍伟晶岩脉赋

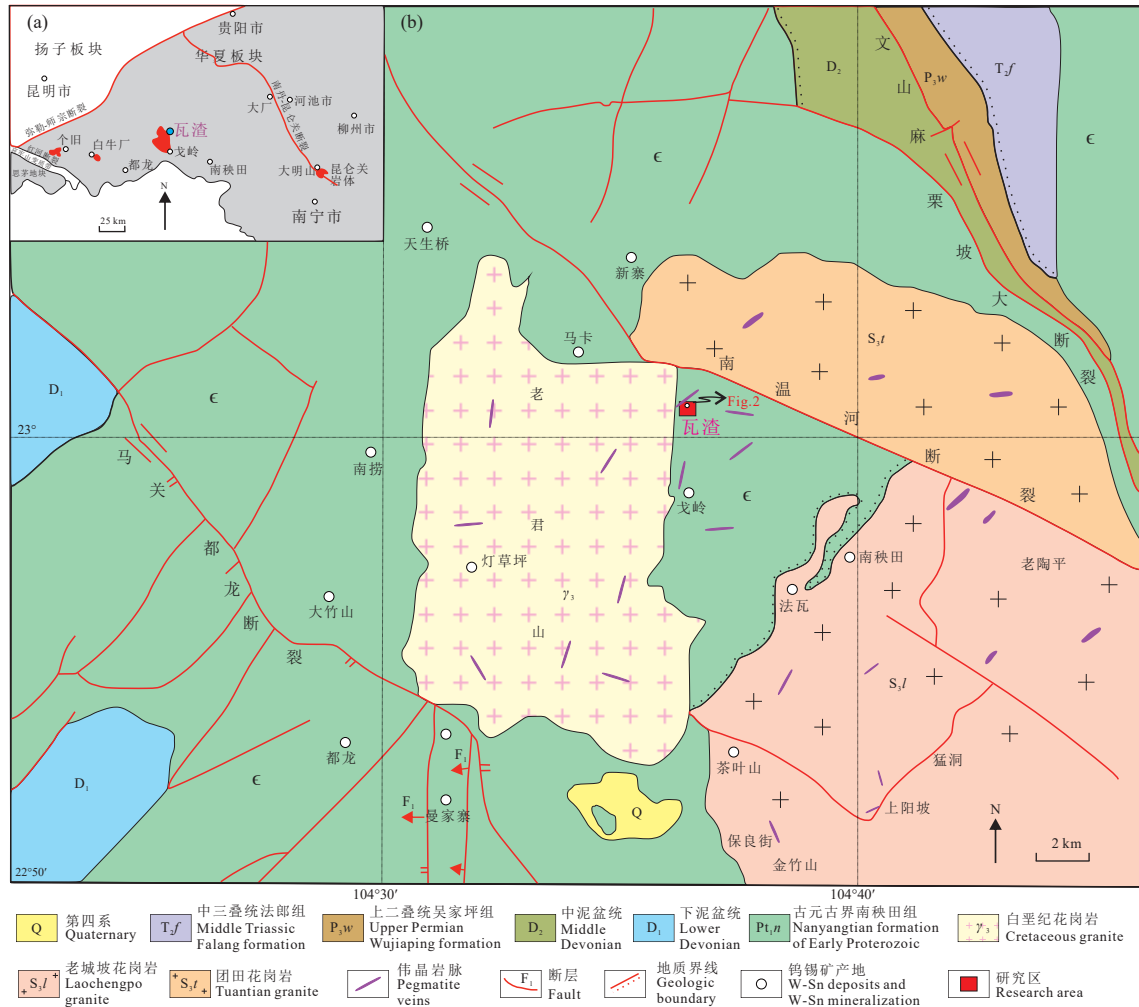


图 1 滇东南—桂西区域地质和多金属矿床分布图(a, 据程彦博等, 2008 修改); 滇东南老君山地区地质简图及伟晶岩脉分布图(b, 据张振发等, 2018 修改)

Fig.1 Geological map showing regional geology and polymetallic mineral deposits in Southeastern Yunnan–Western Guangxi (a, modified from Cheng Yanbo et al., 2008); Simplified geological map with the distribution of pegmatite veins in Laojunshan area, Southeastern Yunnan (b, modified from Zhang Zhenfa et al., 2018)

存于古元古界南秧田岩组第二段靠底部的云母片岩、片麻岩中, 与围岩产状基本一致或低角度斜交(图 3a~c)。伟晶岩具有一定的分带性, 从外至内可以将其划分为五个带: 电气石长石带(I带)、长石石英带(II带)、长石带(III带)、电气石长石带(IV带)、长石石英带(V带)(图 3d)。含铍矿物主要为绿柱石, 粒度中等大小, 粒径为 1~5 cm, 多数矿物呈六方柱状, 具有较高的自形程度(图 3e), 仅有少量的块状浸染状矿物呈半自形—他形。绿柱石富集在钠长石化带或伟晶岩脉膨大处, 分布于石英、长石、大片白云母边缘, 富集与交代作用正相关(图 4a)。含矿脉体为长英质, 脉以乳白色—白色长石、灰色

石英为主, 约占 95 %, 其次为浸染状或放射状黑色电气石, 约占 5 %, 多数集中在脉体边部, 或以不规则的细脉状分布于脉体内部(图 4b, c)。石英分两类, 一类呈巨晶半自形粒状分布(图 4d), 另一类呈细脉状分布在巨晶矿物(钠长石)的缝隙中(图 4); 钠长石与钾长石均为半自形—他形板状(图 4d~f), 电气石常呈团簇状或柱状产出。

3 样品及分析方法

本文用于锆石 U-Pb 同位素测年、全岩主微量元素及 Sr-Nd 同位素分析的伟晶岩样品均来自瓦渣铍矿床 3#和 4#含绿柱石伟晶岩脉。矿床中主要



图2 瓦渣钨铍矿区地质简图^①
Fig.2 Geological map of Wazha W-Be deposit^①

含铍矿物为绿柱石,包裹体的分析均来自于绿柱石。

伟晶岩样品的单颗粒锆石在北京科荟测试技术有限公司采用 LA-ICP-MS 技术对其进行锆石 U-Pb 定年测试分析,使用的仪器为 AnalytikJena PQMS Elite 型 ICP-MS 及其配套的 RESolution 193 nm 准分子激光剥蚀系统。测试过程中,采用单点剥蚀的方式,斑束直径为 24 μm ,频率为 6 Hz,能量密度约为 5 J/cm²,以 He 为载气。

包裹体镜下观察在云南大学地球科学学院显微实验室利用 Leica DM2700P 完成。包裹体显微测温在昆明理工大学国土资源工程学院利用 Linkam THM600 冷热台完成。流体包裹体成分分析在云南大学地球科学学院激光拉曼光谱实验室完成,测试仪器为英国 Renishaw 公司生产的 InVia 型显微共焦激光拉曼光谱仪,测试条件为: Spectra-

Physics 氩离子激光器,波长 532 nm,光栅 1800,扫描时间 30 s,激光功率 20 mW,取样范围主要集中在 100~4000 cm⁻¹。

全岩主量元素测试在长安大学成矿作用及动力学实验室采用日本岛津 XRF-1800 型荧光光谱仪完成,微量元素分析在中国地质科学院国家地质实验测试中心采用 JA200-LA 型号的电感耦合等离子质谱仪完成。全岩 Sr-Nd 同位素测试工作在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成,采用的标样为 BHVO-1 和 BCR-2,详细的实验流程见(Tian et al., 2020)。

伟晶岩样品碎样流程:仔细核对伟晶岩样品后,先去除样品表面的污物,通过刷洗和吹净完成表面清洁。接着,对于直径大于 4 cm 的样品,采用人工破碎方式,用铁锤击碎样品,去除产生的粉末,拣选均匀碎块放入牛皮纸袋中以防落入灰尘。随

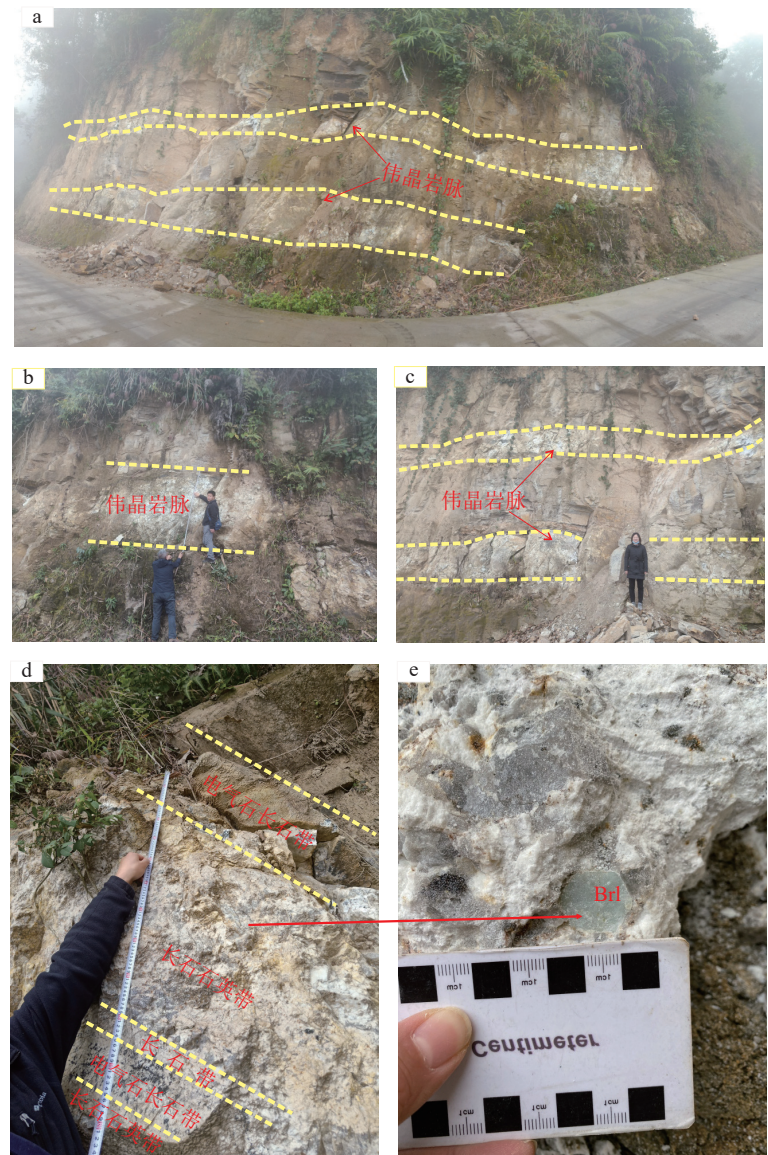


图 3 4#号脉的脉体分布特征(a~c); 3#脉矿物分带性(d); 3#脉长英带中的绿柱石晶体(e)
Fig.3 The distributed characteristics of 4 # vein (a~c); 3 # vein show the mineral zonation (d); Beryl crystal in feldspar quartz belt of 3 # vein (e)

后,将粗碎并精选好的样品用去离子水冲洗三遍或放入超声波清洗机彻底清洗干净,置于温度低于 45℃ 的干燥箱中烘干。待样品烘干且确认无污染后,将其放入碎样机进行细碎,直至粒度小于 0.5 cm,进行缩分。缩分完成将小于 0.5 cm 的正样放入无污染玛瑙球磨机的玛瑙罐内研磨至所需的粒度。最后,将球磨好的样品装入干净的塑料小袋密封,再放入牛皮纸袋中,这样既保证了样品的密封性,又防止塑料小袋在携带运输过程中意外破损或导致样品混杂。

4 分析结果

4.1 锆石年代学

瓦渣伟晶岩样品中锆石颗粒主要呈棱柱形、长柱形,大小约为 60~250 μm,宽长比一般在 3 : 2~1 : 1。由于热液蚀变作用,锆石的颜色比较暗,而且从伟晶岩中挑出的锆石在 CL 图中部分发光,出现了振荡环带结构,与岩浆锆石的结构特征相一致(吴元保和郑永飞,2004)。

在锆石稀土元素球粒陨石标准化配分图中

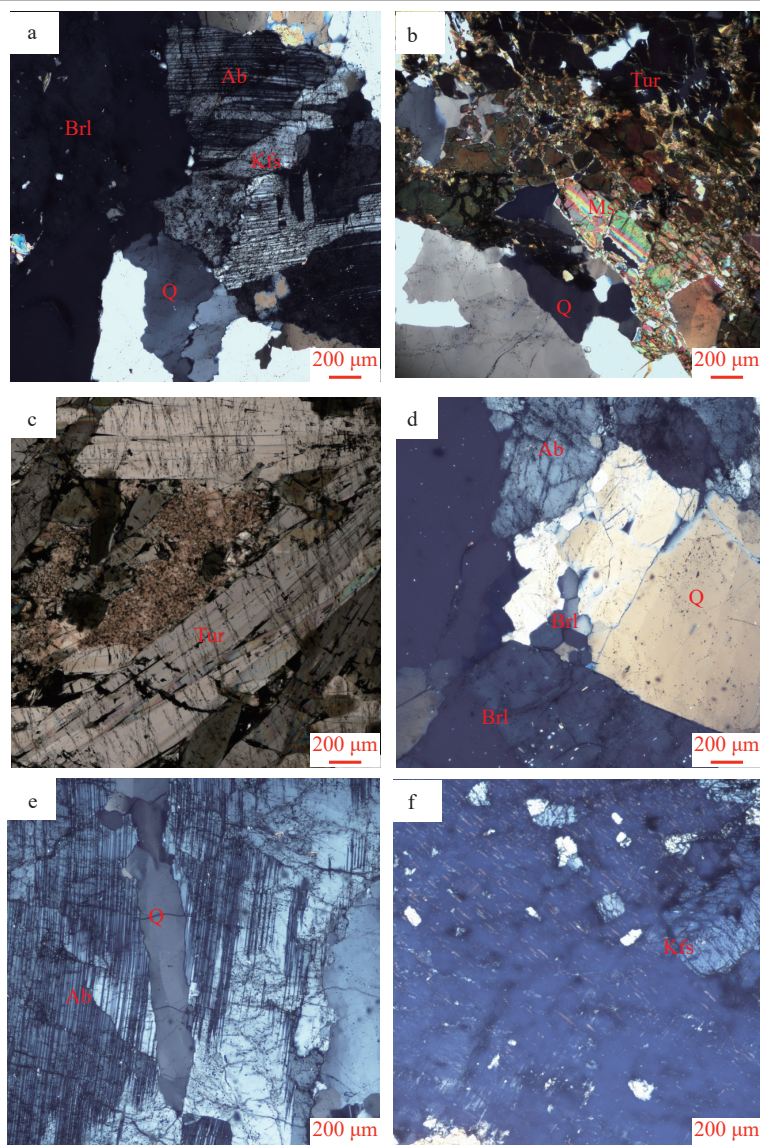


图4 瓦渣钨铍矿区伟晶岩脉中代表性矿物特征

a—绿柱石与钠长石、钾长石、石英共生; b—呈成集合体分布的中—细粒电气石, 具环带结构; c—自形—半自形粗粒电气石; d—石英包裹绿柱石晶簇; e—石英脉穿切绿柱石; f—钠长石部分泥化及白云母化; Ab—钠长石; Q—石英; Tur—电气石; Brl—绿柱石; Ms—白云母; Kfs—钾长石

Fig.4 Microscopic characteristics of the representative minerals in pegmatite veins of Wazha W-Be deposit

a—Paragenesis between beryl with albite, potassium feldspar, quartz; b—Medium-fine tourmaline distributed as aggregate; c—Euhedral- subhedral coarse tourmaline; d—Quartz enclosing the clusters of beryl crystals; e—Quartz veins cutting beryl; f—Argillation and muscovite of the partial albite crystals; Ab—Albite; Q—Quartz; Tur—Tourmaline; Brl—Beryl; Ms—Muscovite; Kfs—K-feldspar

(图 5a), 稀土元素从 La 到 Lu 的含量迅速增加, 具有明显的 HREE 元素富集, 并存在 Ce 和 Eu 异常富集, 属于典型的岩浆锆石特征。在锆石类型判别图解中(图 5b), 伟晶岩样品中的锆石也表现出岩浆锆石的特征(Li et al., 2018)。

瓦渣长石石英伟晶岩样品中 9 粒锆石的分析测试结果(表 1)表明, 伟晶岩脉的形成年龄介于 182.4~193.8 Ma, 经过 ^{207}Pb 校正后 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平

均年龄为 $(187.9 \pm 1.4) \text{ Ma}$ (MSWD=1.12, $n=9$)(图 6)。

4.2 流体包裹体

绿柱石中包裹体呈不规则或规则状, 沿裂隙成群或自由分布(图 7, 表 2)。包裹体主要分为气液两相包裹体(液相包裹体)、含子晶的三相包裹体(卢焕章等, 2004)。

对绿柱石中原生包裹体的气相和晶体组分进行显微激光拉曼光谱(LRM)测试, 结果如图 8 所

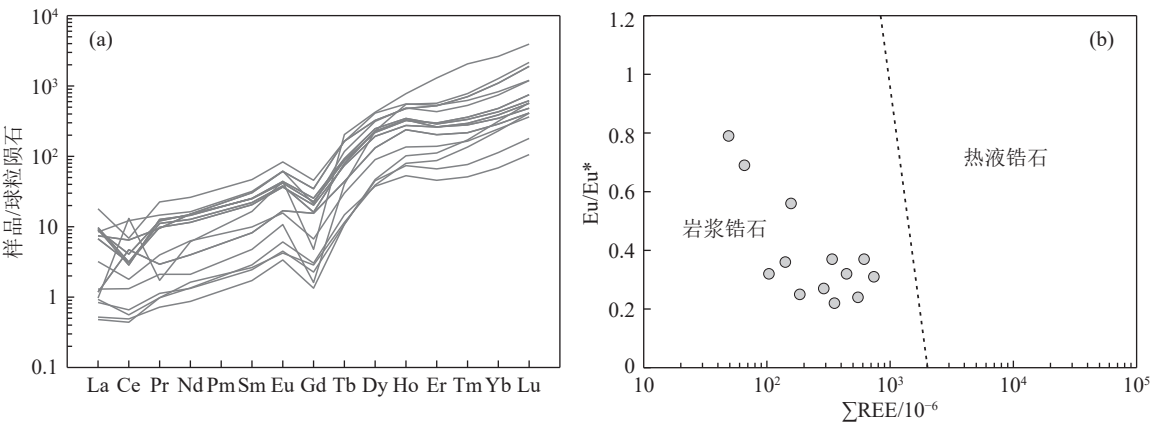


图 5 锆石稀土元素球粒陨石标准化配分图(a, 据 Sun and McDonough, 1989)及锆石成因判别图解(b, 底图据 Li et al., 2018)
Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns of zircon(a, modified from Sun and McDonough,1989), diagram for the genesis identification of zircon (b, modified from Li et al., 2018)

表 1 伟晶岩锆石 U-Pb 同位素测年结果
Table 1 Zircon U-Pb isotopic dating results of the Wazha pegmatite

测点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值								同位素年龄/Ma			
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
XZ-1-1	292.3	395.0	8175.4	0.05	0.0521	0.0005	0.2179	0.0060	0.0305	0.0009	287.1	28.7	200.1	5.0	193.8	5.4
XZ-1-2	84.0	244.4	2729.2	0.09	0.0606	0.0010	0.2438	0.0054	0.0296	0.0006	633.4	37.0	221.5	4.4	187.9	3.9
XZ-1-3	210.4	187.4	6068.0	0.03	0.0522	0.0005	0.2140	0.0027	0.0298	0.0003	294.5	22.2	196.9	2.2	189.0	1.9
XZ-1-4	46.4	99.9	1349.3	0.07	0.0554	0.0012	0.2229	0.0046	0.0295	0.0004	427.8	43.5	204.3	3.8	187.1	2.3
XZ-1-5	41.0	18.6	1186.0	0.02	0.0496	0.0009	0.2010	0.0036	0.0294	0.0003	189.0	8.3	186.0	3.1	187.0	1.8
XZ-1-6	207.0	356.4	6019.3	0.06	0.0549	0.0007	0.2166	0.0026	0.0287	0.0003	409.3	23.1	199.1	2.2	182.4	1.8
XZ-1-7	520.6	1554.8	15974.5	0.10	0.0532	0.0006	0.2187	0.0050	0.0298	0.0006	338.9	21.3	200.8	4.2	189.5	4.0
XZ-1-8	128.4	226.9	3712.5	0.06	0.0549	0.0008	0.2224	0.0033	0.0295	0.0003	405.6	31.5	203.9	2.8	187.2	1.8
XZ-1-9	92.8	323.7	2580.4	0.13	0.0601	0.0008	0.2410	0.0043	0.0289	0.0002	609.3	25.0	219.3	3.5	183.9	1.5

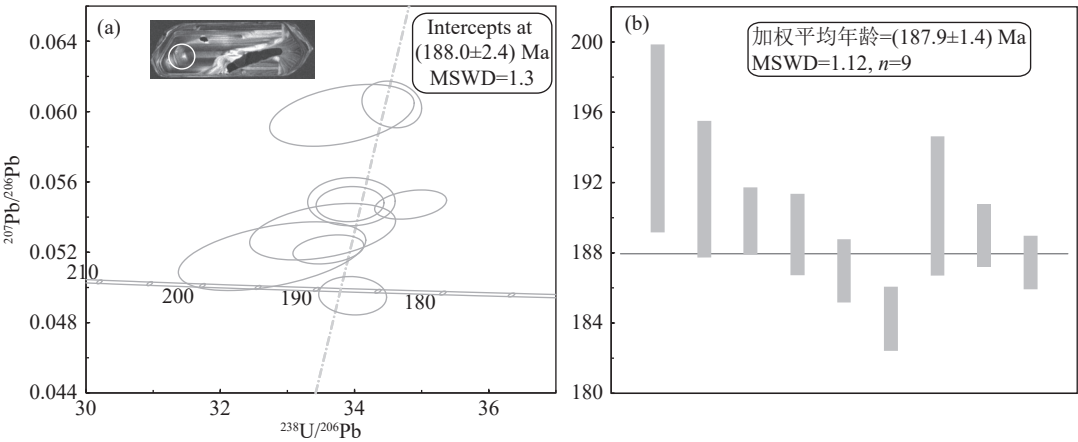


图 6 伟晶岩锆石 U-Pb 年龄结果
Fig.6 U-Pb concordia diagram of zircon from the pegmatite vein

示。在气液两相包裹体中,存在 3607 cm^{-1} 峰,表明绿柱石晶体结构隧道中存在着 I 型水和 II 型水(图 8a, 胡志康, 2019); 位于 2328 cm^{-1} 处的拉曼峰,为 N-N 键的拉曼峰值特征,推测绿柱石中可能存在 N_2 分子; CO_2 分子中的费米耦合共振引起的两个峰出现在 1284 cm^{-1} 和 1387 cm^{-1} 的附近(图 8a, b)。 684 cm^{-1} 处的峰可以被认为是由 Si-O-Si 的弯曲振动产生, 1068 cm^{-1} 处的峰可能是由于 CO_3^{2-} 中的伸

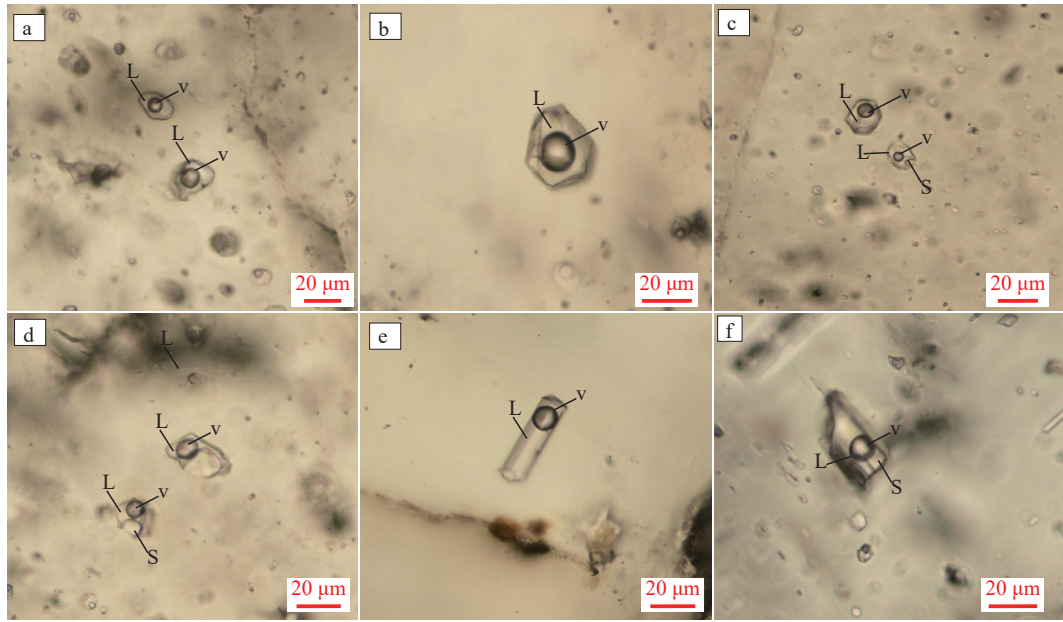


图 7 流体包裹体显微图
a, b—液相包裹体; c, d, e—含子晶三相包裹体; f—负晶形包裹体
Fig.7 Micrographs of the fluid inclusions

a, b—Liquid phase inclusions; c, d, e—Three-phase inclusions containing subcrystalline; f—Negative crystalline inclusions

表 2 包裹体物理形态特征

Table 2 Physical characteristics of inclusions

样品	主矿物	类型	室温组成形态	粒径/ μm	形态	分布特点
cxz-1 (横切)	绿柱石	液体包裹体; 含子矿物包裹体	L+V; L+V+子矿物	3~33 μm	规则; 不规则	自由分布或沿裂隙成群分布
cxz-1 (纵切)	绿柱石	液体包裹体; 含子矿物包裹体	L+V; L+V+子矿物	3~37 μm	规则; 不规则	自由分布或沿裂隙成群分布
cxz-3(纵切)	绿柱石	液体包裹体; 含子矿物包裹体	L+V; L+V+子矿物	3~38 μm	规则; 不规则 (纵切)	自由分布或沿裂隙成群分布

缩振动产生(胡志康, 2019), 同时也可能包含 F^- 。通过对气体的拉曼光谱分析可见 2 个尖峰, 2328 cm^{-1} 处应归属于 N_2 , 而 2916 cm^{-1} 应为 CH_4 的特征吸收峰(图 8b, Frezzotti et al., 2012)。

本文选取绿柱石中形态较佳、结构清晰、直径大于 $7\text{ }\mu\text{m}$ 的气液两相和少量的含子晶包裹体进行测温, 测试温度为流体包裹体均一温度、冰点温度及子晶融化温度, 测试结果见表 3。气液两相包裹体温度范围介于 $223.6\sim 382.3^\circ\text{C}$, 平均温度为 259.9°C , 主要集中在 $240\sim 280^\circ\text{C}$ (图 9a)。冰点温度介于 $-6.8^\circ\text{C}\sim -3.2^\circ\text{C}$, 其平均值为 -5.13°C , 且多数集中在 $-4\sim -6^\circ\text{C}$, 流体温度处于中温阶段(9b)。含子晶包裹体的温度范围为 $229.5\sim 273.6^\circ\text{C}$, 平均值约为 248.38°C , 温度主要集中在 $240\sim 260^\circ\text{C}$ 。子晶的融化温度范围在 $255.8\sim 412.5^\circ\text{C}$, 其平均融化温度为 371.83°C 。以上特征表明瓦渣矿床的主成矿阶段流

体具有中温特征。

根据所测得的冰点温度数据, 计算出相应的流体包裹体的盐分含量。采用 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系盐度-冰点公式(Hall et al., 1988), 如下:

$$W = 1.78 \cdot T_m - 4.42 \cdot 10^{-2} \cdot T_m^2 + 5.57 \cdot 10^{-4} \cdot T_m^3$$

其中, W 为盐度(NaCl 的重量百分数); T_m 为冰点温度($^\circ\text{C}$)。

Hall et al. (1988) 研究表明, 当冰点温度变化时, 盐度也会发生相应的变化, 其变化关系可用如下公式表示:

$$\begin{aligned} W_{\text{NaCl}} = & 26.242 + 0.4928\psi + 1.42\psi^2 - 0.223\psi^3 + \\ & 0.04129\psi^4 + 0.006295\psi^5 - 0.001967\psi^6 + \\ & 0.0001112\psi^7; \psi = T/100 \end{aligned}$$

其中, T 为石盐子晶的消失温度, 温度范围为 $0.1^\circ\text{C} \leq T \leq 801^\circ\text{C}$ 。

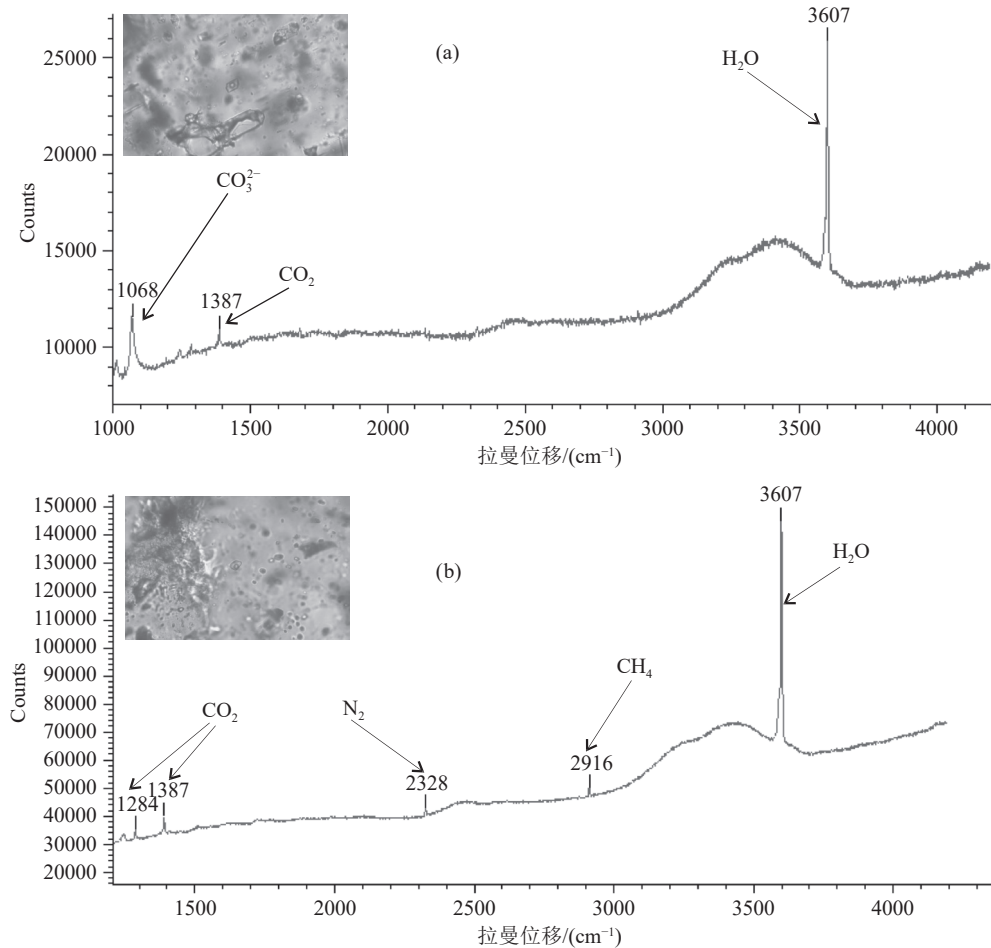


图 8 绿柱石包裹体及含子晶包裹体激光拉曼成分分析图

Fig. 8 Laser Raman spectroscopic analysis of the inclusions and subcrystal-bearing inclusions in beryls

气液两相包裹体盐度变化 4.8%~10.2%, 平均盐度为 8%, 集中于 6%~8%(图 9c), 属于中盐度。含子晶三相包裹体的盐度变化为 35.05%~48.83%, 平均盐度为 44.99%, 集中于 45%~50%(图 9d)。含石盐子晶三相包裹体的出现, 显示流体具有高盐度的特点。

4.3 主量元素

本文分析了 3 件电气石伟晶岩、3 件绿柱石伟晶岩、6 件长石石英伟晶岩, 其分析结果见表 4。分析结果显示, 电气石伟晶岩、绿柱石伟晶岩、长石石英伟晶岩 SiO_2 含量变化范围大, 分别为 63.2%~73.74%、64.55%~80.35%、70.74%~78.36%; Al_2O_3 含量的变化范围也较大, 为 14.72%~19.67%; 11.96%~18.66%; 12.34%~16.36%; K_2O 、 Na_2O 、 CaO 含量也表现出较大的变化范围。主量元素含量变化较大的原因可能是由于伟晶岩中矿物粒度大, 矿物分布不均一, 导致不同样品测定出的主元素含量变化

较大。

样品的 A/NK 比值范围在 1.07~14.7, 平均值 2.87; 铝饱和指数(A/CNK)范围为 0.91~4.16, 平均值 1.32, 属于铝饱和系列。在 A/NK-A/CNK 图解(图 10a)中, 样品的 A/CNK 比值极为接近, 大部分处于准铝质和过铝质之间。里特曼组合指数(σ)介于 0.35~8.14, 表明岩石属于碱性—钙碱性系列, 与 SiO_2 - K_2O 图解(图 10b)一致。除样品 XZ-1 电气石伟晶岩和 XZ3-1 电气石伟晶岩的分异指数(DI)为 66.62、77.74 外, 其余样品的分异指数都在 97 左右, 表明岩浆结晶分异程度较高, 岩浆演化较为彻底(关俊雷等, 2016)。

4.4 微量元素

样品稀土元素球粒陨石标准化配分图(图 11a)呈现出缓倾斜的右倾型, 表明轻稀土元素略为富集。长石石英伟晶岩、绿柱石伟晶岩、电气石伟晶

表 3 绿柱石包裹体显微测温数据

Table 3 Microthermometric data of the beryl inclusions									
样号	序号	主矿物	形态	大小/ μm	类型	V/T	子晶融化温度Ths/ $^{\circ}\text{C}$	全部均一温度Th/ $^{\circ}\text{C}$	冰晶全融化温度Tm/ $^{\circ}\text{C}$
XZ-3	1	绿柱石	矩形	14.82	L+V	60%		251.6	-4.9
XZ-3	2	绿柱石	四边形	14.2	L+V	30%		226.9	-3.8
XZ-3	3	绿柱石	不规则	16.67	L+V	40%		230.6	-4.5
XZ-3	4	绿柱石	负晶形	27.75	L+V	30%		253.8	-4
XZ-3	5	绿柱石	四边形	12.28	L+V	50%		266.8	-3.2
XZ-3	6	绿柱石	规则	28.5	L+V	55%	255.8	256.4	-3.3
XZ-3	7	绿柱石	不规则	19.42	L+V	55%		254.8	-4.6
XZ-3	8	绿柱石	不规则	25.46	L+V+S	60%	412.4	273.6	-5.2
XZ-3	9	绿柱石	不规则	18.74	L+V	60%		273.7	-5.1
XZ-3	10	绿柱石	不规则	33.59	L+V	50%		294.9	-3.6
XZ-3	11	绿柱石	负晶形	36.58	L+V+S	45%		254.6	-4
XZ-3	12	绿柱石	不规则	23.5	L+V	60%		251.8	-6.5
XZ-3	13	绿柱石	不规则	14.76	L+V	50%		232.3	-6.7
XZ-3	14	绿柱石	不规则	15.46	L+V	50%		262.5	-2.9
XZ-3	15	绿柱石	不规则	20.9	L+V	50%		318.7	-3.4
XZ-3	16	绿柱石	不规则	12.19	L+V	45%		266.3	-6.2
XZ-3	17	绿柱石	不规则	13.81	L+V	40%		253.4	-5.6
XZ-3	18	绿柱石	不规则	15.63	L+V	50%		290.5	-3.3
XZ-3	19	绿柱石	不规则	14.46	L+V	40%		256.5	-3.6
XZ-3	20	绿柱石	不规则	13.72	L+V	30%		254.7	-5.2
XZ-3	21	绿柱石	不规则	17.89	L+V	40%		258.6	-5.7
XZ-3	22	绿柱石	负晶形	16.32	L+V	40%		223.6	-6.7
XZ-3	23	绿柱石	四边形	14.22	L+V+S	35%	412.5	241.5	-4.9
XZ-3	24	绿柱石	不规则	15.08	L+V	50%		249.2	-4.1
XZ-3	25	绿柱石	不规则	15.2	L+V	40%		226	-4.9
XZ-3	26	绿柱石	不规则	10.68	L+V	60%		255.9	-6.7
XZ-3	27	绿柱石	不规则	20.41	L+V	45%		256.7	-5.6
XZ-3	28	绿柱石	不规则	11.53	L+V	35%		250.9	-4.7
XZ-3	29	绿柱石	不规则	12.32	L+V	40%		267.9	-5.6
XZ-3	30	绿柱石	不规则	18.64	L+V	50%		258.6	-6.1
XZ-1	31	绿柱石	椭圆	10	L+V	30.00%		267.5	-4.4
XZ-1	32	绿柱石	椭圆	17.1	L+V	55.00%		256.5	-6.6
XZ-1	33	绿柱石	椭圆	15.52	L+V+S	50.00%	359.1	229.5	-6.8
XZ-1	34	绿柱石	不规则	21.47	L+V+S	55.00%		275.4	-5.5
XZ-1	35	绿柱石	椭圆	9.05	L+V	35.00%		266.7	-6.2
XZ-1	36	绿柱石	不规则	10.21	L+V+S	65.00%	409.7	246.3	-5.1
XZ-1	37	绿柱石	不规则	10.88	L+V	40.00%		274.1	-5.3
XZ-1	38	绿柱石	不规则	10.61	L+V+S	35.00%	381.5	243	-5.3
XZ-1	39	绿柱石	不规则	8.81	L+V	50.00%		254.9	-5.1
XZ-1	40	绿柱石	椭圆	10.42	L+V	50.00%		268.2	-5.3
XZ-1	41	绿柱石	五边形	7.51	L+V	50.00%		241.9	-6.8
XZ-1	42	绿柱石	不规则	14.41	L+V	45.00%		251.2	-5.7
XZ-1	43	绿柱石	不规则	9.68	L+V	30.00%		255.7	-4.9
XZ-1	44	绿柱石	不规则	7.73	L+V	50.00%		252.6	-6.1

注：L+V=气液两相包裹体；L+V+S=含子晶三相包裹体；V/T=气相所占百分比；Ths=子晶融化温度；Th=全部均一温度；Tm=冰晶全融化温度。

岩的 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 平均值分别为 3.27、2.41、3.33, 表明轻稀土元素内部具有较强的分馏; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 的平均值分别为 2.44×10^{-6} 、 2×10^{-6} 和 7.77×10^{-6} , 反映轻重稀土元素之间也具有一定的分馏特征。在微量元素原始地幔标准化配分图中(图 11b), 样品均表现出 W 形震荡, 富集 Rb、Th、U、Ta 等大离子亲石元

素, 亏损 Ba、Nd、Sm、Ti 等高场强元素。
4.5 Sr–Nd 同位素
选取具有代表性的 3 件伟晶岩样品(电气石伟晶岩、长石石英伟晶岩)进行了 Sr–Nd 同位素测试, 分析结果见表 5。样品 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}}=0.702740\sim 0.732013$, 变化范围较大, 可能受到岩浆期后热液交

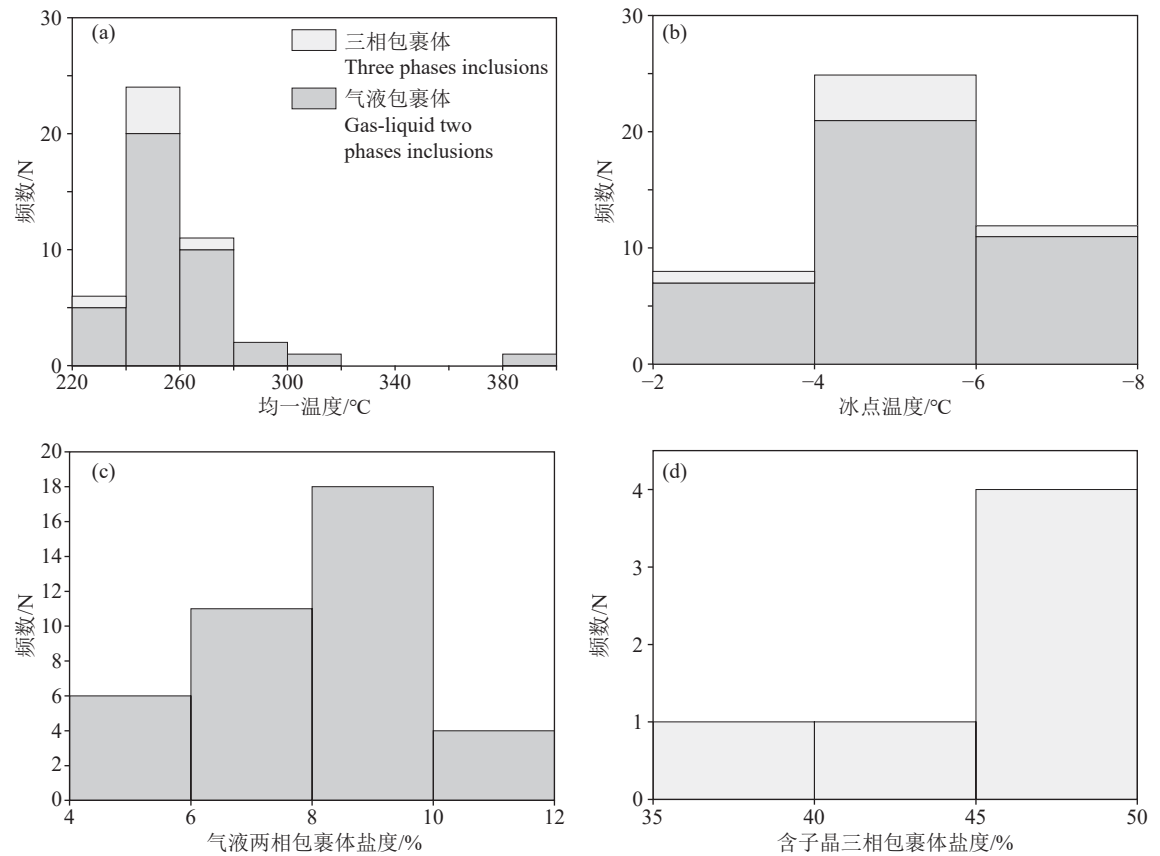


图 9 包裹体均一温度直方图(a);包裹体冰点温度直方图(b);气液两相包裹体盐度直方图(c);含子晶包裹体盐度直方图(d)
Fig.9 Histogram of homogeneous temperature for the two types of inclusions (a); Histogram of freezing point temperature for the two types of inclusions (b); Salinity frequency histogram of gas-liquid two-phase inclusions (c); The salinity frequency histogram of subcrystal-bearing inclusions (d)

表 4 瓦渣含铍伟晶岩全岩主量元素 (%)、微量元素 (10⁻⁶) 分析结果

Table 4 Analysis results of the major elements (%) and trace elements (10 ⁻⁶) for the Wazha beryllium-bearing pegmatites												
样品名称	电气石伟晶岩				长石石英伟晶岩					含绿柱石伟晶岩		
样品编号	XZ-1	XZ-3-1	XZ-3-3	XZ-2	XZ-3-4	XZ-3-5	XZ-4-1	LAZ-1	LAZ-2	XZ-3-2	LAZ-3	XZ-4-2
SiO ₂	63.20	64.54	73.74	64.55	73.60	75.35	80.35	75.17	71.07	70.74	78.36	66.17
TiO ₂	0.55	0.32		0.02			0.01	0.01			0.01	0.07
Al ₂ O ₃	19.67	19.39	14.72	18.66	15.02	14.41	11.96	14.47	16.13	16.36	12.34	19.29
TFe ₂ O ₃	6.70	5.26		0.55	0.01							1.12
MnO	0.08	0.10	0.01	0.06	0.25	0.14	0.03			0.11	0.01	0.03
MgO	2.52	1.29	0.09	0.19	0.09	0.09	0.10	0.09	0.10	0.09	0.12	0.51
CaO	0.72	1.19	0.38	1.79	0.47	0.50	0.51	0.61	0.44	0.48	0.48	0.50
Na ₂ O	0.85	5.64	2.61	5.23	5.33	5.85	6.39	8.25	4.34	5.61	5.13	6.55
K ₂ O	1.87	0.07	8.78	8.03	5.16	3.49	0.35	0.17	7.75	5.92	2.96	4.38
P ₂ O ₅	0.01	0.44	0.03	0.66	0.06	0.05	0.03	0.03	0.04	0.06	0.03	0.03
LOI	2.90	0.93	0.16	0.54	0.21	0.29	0.59	1.68	0.67	0.95	0.75	0.78
Total	99.07	99.17	100.52	100.3	100.2	100.2	100.3	100.5	100.5	100.3	100.2	99.43
A/CNK	4.16	1.68	1.02	0.91	0.99	1.01	1.01	0.97	0.99	0.99	0.99	1.17
A/NK	14.07	2.09	3.43	2.17	1.71	1.50	1.14	1.07	2.26	1.77	1.46	1.79
Li	109.4	5.77	5.34	1.96	7.70	6.96	4.94	3.23	3.54	4.04	5.93	26.40
Be	38.23	13.57	2.13	4.06	188.80	127.40	10.57	6.40	3.30	34.77	7.58	514.20
Sc	10.57	3.90	2.71	2.40	2.91	2.80	2.01	2.48	2.77	0.48	2.05	3.87
Ti	4465	2188	13.1	128.5	8.1	16.9	11.6	19.2	18.3	7.9	35.7	361.2
P	44	1921	131	2882	262	218	131	131	175	262	131	131

续表 4

样品名称	电气石伟晶岩			长石石英伟晶岩						含绿柱石伟晶岩		
样品编号	XZ-1	XZ-3-1	XZ-3-3	XZ-2	XZ-3-4	XZ-3-5	XZ-4-1	LAZ-1	LAZ-2	XZ-3-2	LAZ-3	XZ-4-2
V	55.93	29.06	0.93	6.84	0.49	0.41	0.48	0.33	0.40	0.17	1.33	11.85
Cr	29.62	15.19	3.22	3.24	9.33	1.31	0.72	1.11	1.59	0.88	0.82	1.00
Mn	421	525	8	313	1201	737	144	29	3	518	14	123
Co	15.48	9.70	0.58	0.60	0.38	0.25	0.17	0.14	0.12	0.24	0.24	2.16
Ni	16.19	6.63	1.04	1.73	2.20	0.68	0.47	0.49	0.61	0.93	0.60	2.17
Cu	13.24	10.04	3.01	6.22	4.46	3.52	2.11	1.81	2.19	3.47	2.21	4.49
Zn	133.8	388.6	4.75	17.27	5.70	9.69	6.13	6.43	11.37	4.83	8.01	57.00
Ga	31.86	30.47	9.60	18.28	16.17	14.77	14.09	16.62	11.62	13.92	11.90	21.56
Ge	2.88	3.58	5.49	3.96	6.13	5.50	4.36	4.67	4.42	4.30	4.05	5.01
As	2.31	4.61	36.24	1.51	8.37	22.50	7.93	0.93	1.54	7.89	0.98	8.36
Rb	221.0	1.8	821.6	1035	442.8	298.2	16.9	5.4	556.4	415.2	186.0	275.5
Sr	30.99	13.27	18.71	266.6	11.89	17.26	16.44	8.23	26.83	25.63	14.28	42.33
Y	9.78	6.30	0.05	5.51	0.82	0.51	0.50	0.39	0.22	1.17	1.87	3.40
Zr	38.99	54.91	0.84	16.30	21.91	8.02	19.46	1.66	4.15	2.85	30.75	11.44
Nb	9.38	36.51	4.29	9.86	25.87	41.10	0.67	5.15	3.61	17.44	2.42	13.39
Mo	0.36	0.08	0.10	0.15	0.12	0.10	0.79	0.10	0.12	0.11	0.12	0.09
Cd	0.21	0.06	0.00	0.04	0.13	0.09	0.04	0.01	0.00	0.06	0.00	0.10
In	0.10	0.04	0.00	0.03	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Sn	88.82	26.21	1.19	25.77	4.70	2.86	1.16	1.65	0.94	1.88	1.88	7.17
Sb	0.09	0.09	0.29	0.15	0.11	0.11	0.07	0.12	0.19	0.08	0.11	0.17
Cs	34.70	2.52	265.70	45.17	58.35	36.64	4.18	1.78	63.71	50.97	22.01	61.55
Ba	111.0	1.06	27.03	310.4	27.09	21.27	12.68	3.32	46.02	46.71	24.75	96.16
La	15.43	8.07	0.03	3.08	0.19	0.22	0.10	0.10	0.06	0.34	0.22	1.73
Ce	20.79	18.65	0.10	6.77	0.15	0.38	0.11	0.05	0.09	0.41	0.18	1.29
Pr	3.73	2.12	0.01	0.67	0.03	0.04	0.02	0.02	0.01	0.07	0.05	0.33
Nd	13.40	8.22	0.02	2.16	0.14	0.15	0.09	0.07	0.06	0.25	0.18	1.15
Sm	2.65	1.87	0.01	0.52	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02	0.07	0.09	0.36
Eu	0.41	0.14	0.01	0.21	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.09	0.06	0.17
Gd	2.45	1.83	0.00	0.66	0.04	0.05	0.05	0.02	0.03	0.08	0.17	0.50
Tb	0.37	0.27	0.00	0.13	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.12
Dy	2.08	1.30	0.00	0.80	0.11	0.05	0.07	0.05	0.04	0.11	0.22	0.70
Ho	0.44	0.21	0.00	0.15	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.14
Er	1.22	0.52	0.00	0.48	0.06	0.04	0.03	0.04	0.02	0.06	0.11	0.38
Tm	0.18	0.07	0.00	0.08	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.05
Yb	1.17	0.47	0.00	0.60	0.08	0.04	0.04	0.04	0.03	0.08	0.13	0.40
Lu	0.18	0.06	0.00	0.10	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.06
Hf	2.72	5.45	0.08	2.66	4.96	1.69	3.88	0.23	0.64	0.49	5.41	2.56
Ta	2.23	24.02	2.86	12.37	11.87	24.42	0.49	3.90	2.35	7.45	1.33	6.14
W	7.70	5.15	1.61	1.06	2.73	3.28	7.84	1.04	0.83	2.07	0.48	3.86
Tl	1.50	0.09	4.85	6.15	2.78	1.81	0.26	0.11	3.29	2.40	1.18	2.22
Pb	10.52	5.73	51.77	43.48	32.58	22.59	9.04	10.55	37.65	29.70	16.19	25.35
Bi	0.08	1.28	0.67	0.82	1.35	1.44	0.40	0.75	0.46	0.78	1.46	0.31
Th	11.70	7.91	0.05	3.34	0.68	0.55	0.25	0.22	0.16	0.68	0.77	2.51
U	3.76	3.35	0.39	5.29	2.17	1.13	2.05	2.37	1.70	1.20	2.63	8.95
δEu	0.48	0.23	6.54	1.11	3.60	2.03	3.07	2.51	3.33	3.69	1.40	1.21
δCe	0.65	1.08	1.71	1.11	0.44	0.89	0.60	0.29	0.83	0.62	0.42	0.39
$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$	3.76	2.79	3.66	3.80	3.83	3.53	3.13	3.44	1.90	3.21	1.62	3.10
$(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$	1.74	3.23	0.74	0.90	0.40	1.06	1.07	0.51	0.95	0.82	1.05	1.05
$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	9.50	12.36	6.10	3.66	1.68	4.02	1.78	1.86	1.61	3.24	1.18	3.13

代作用的影响(刘涛等, 2020), 尤其当 Sr 含量小于 20×10^{-6} 时, Sr 同位素初始值不足以准确反映岩石的真实性质(Romer et al., 2012)。样品 ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i = 0.511856~0.511870, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -10.3 \sim -10.5$ 。在 Nd 同位素演化图解中, 投点于华南中生代地壳区间内(图 12), 暗示伟晶岩可能来自于古老地壳的部分熔融。

5 讨论

5.1 流体性质

绿柱石矿物中的包裹体包括富含液相的两相水溶液、富含气相的两相水溶液、含有两相水溶液包裹体以及含子晶的三相流体包裹体, 成矿流体为

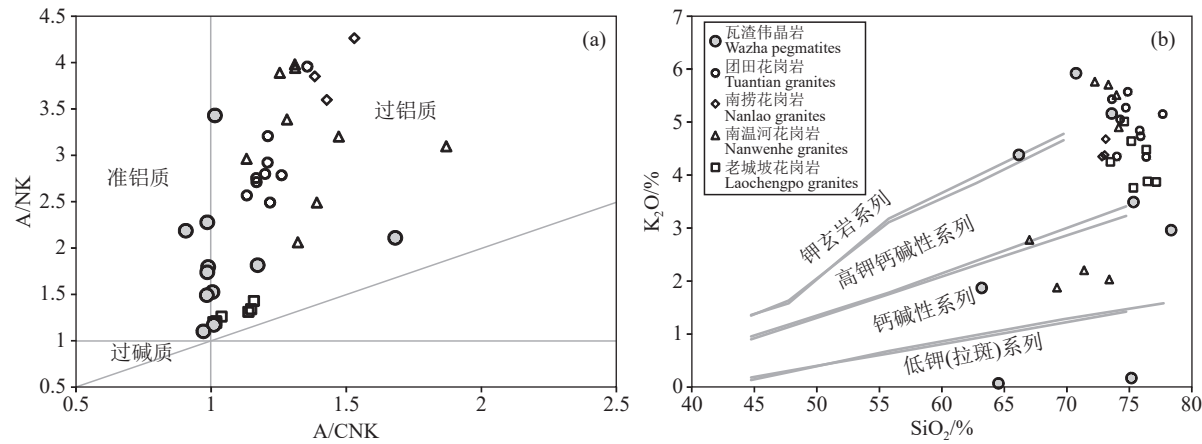


图 10 瓦渣伟晶岩及周边相关花岗岩的 A/NK-A/CNK 图解(a)及 SiO₂-K₂O 图解(b)
团田、南捞花岗岩数据来源于徐斌, 2015; 南温河花岗岩数据来源于徐伟, 2007; 老城坡花岗岩数据来源于潘锦波等, 2015
Fig.10 A/NK-A/CNK (a) and SiO₂ versus K₂O (b) classification diagrams of Wazha pegmatites and related granites in Laojunshan area
The data of Tuan Tian and Nanlao granites from Xu Bin, 2015, data of Nanwenhe granites from Xu Wei, 2007, data of Laochengpo granites are from Pan Jinbo et al., 2015

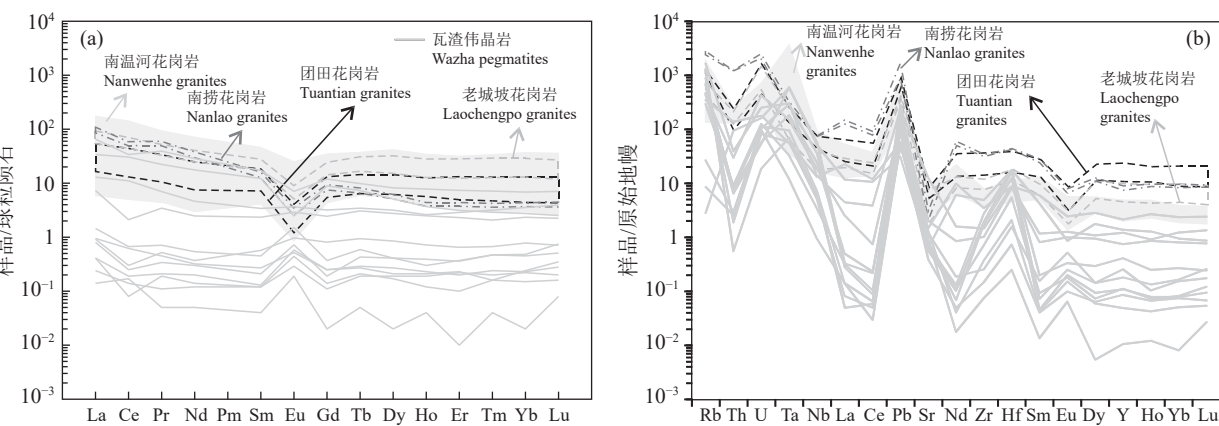


图 11 瓦渣伟晶岩全岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)、全岩微量元素原始地幔标准化配分图(b)
团田、南捞花岗岩数据来源于徐斌, 2015; 南温河花岗岩数据来源于徐伟, 2007; 老城坡花岗岩数据来源于潘锦波等, 2015; 球粒陨石数据来自 Anders and Grevesse, 1989; 据原始地幔数据来自 Sun and McDonough, 1989
Fig.11 Chondrite-normalized REE patterns (a), primitive mantle-normalized immobile trace element diagrams (b) of bulk rock samples from the Wazha pegmatites.
The data of Tuan Tian and Nanlao granites from Xu Bin (2015), data of Nanwenhe granites are from Xu Wei (2007), data of Laochengpo granites are from Pan Jinbo et al. (2015). The chondrite values are from Anders and Grevesse (1989) and the primitive mantle values from Sun and McDonough (1989)

表 5 瓦渣含铍伟晶岩 Sr-Nd 同位素组成													
Table 5 Sr-Nd isotopic composition of the Wazha beryllium-bearing pegmatites													
样品编号	Rb/10 ⁻⁶	Sr/10 ⁻⁶	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	Sm/10 ⁻⁶	Nd/10 ⁻⁶	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ	t/Ma	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i
XZ-1	221	31	20.63	0.757856	0.000006	2.65	13.40	0.119488	0.512017	0.000012	187.9	0.511870	0.702740
XZ-2	1035	267	11.24	0.748481	0.000006	0.52	2.16	0.146287	0.512039	0.000012	187.9	0.511859	0.718462
XZ3-1	2	13	0.39	0.733003	0.000004	1.87	8.22	0.137313	0.512025	0.000011	187.9	0.511856	0.732013

NaCl-H₂O-CO₂-CH₄-N₂ 体系; 包裹体均一温度介于 240~280℃, 大部分温度数据集中在 240~260℃, 这与典型的中温热液矿床温度特征一致。绿柱石流体包裹体的盐度经冰点温度计算测定, 范围在 4.8%~10.2%, 大部分集中在 8%~10%, 平均值为 8%; 表明绿柱石中包裹体形成于中盐度的流体环境, 因此其成矿流体的盐度相对较低。以上特征表明瓦渣矿床的成矿流体是一种以 NaCl-H₂O-CO₂-CH₄-

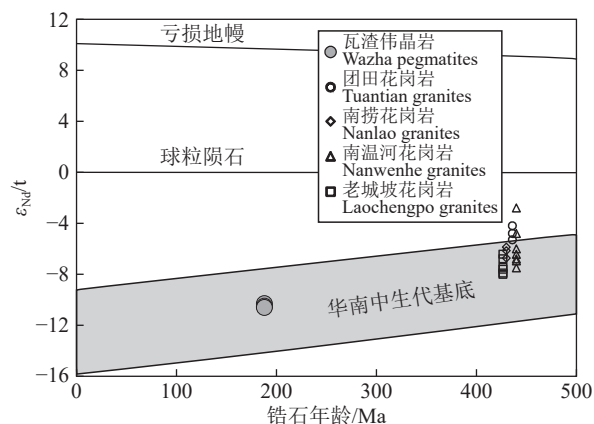


图 12 伟晶岩及周边花岗岩 Nd 同位素演化图解
(团田、南捞花岗岩数据来源于徐斌, 2015; 南温河花岗岩数据来源于徐伟, 2007; 老城坡花岗岩数据来源于潘锦波等, 2015)

Fig.12 Nd isotopic evolution diagram of the Wazha pegmatite and related granites in Laojunshan are

The data of Tuantian and Nanlao granites are from Xu Bin, 2015, data of Nanwenhe granites are from Xu Wei, 2007, data of Laochengpo granites are from Pan Jinbo et al., 2015

N_2 为主要组成的中温-中盐度体系。

在绿柱石流体包裹体中发现了流体不混溶的现象: (1)不同类型的包裹体共生, 即存在多种不同

类型的包裹体(图 13, 卢焕章等, 2004); (2)两相包裹体共存时, 富液相包裹体随着温度升高均一成液相, 而富气相包裹体也会随着温度的增加均一成液相, 但是气液充填度差异很大, 经升温处理后, 这两种类型的包裹体的均一温度变化不大(图 13d); (3)含有子晶三相包裹体、富气相和富液相两相包裹体共存(图 13b、c), 测温后发现不同类型包裹体的均一温度相近, 但盐度变化较大, 表明含石盐子晶三相包裹体来自于高盐度流体, 而气液两相在形成过程中, 成矿流体发生过不混溶作用(卢焕章等, 2004)。

此外, 在绿柱石包裹体中, 还发现了流体熔融包裹体(图 7d), 这类包裹体由硅酸盐、石盐子晶、气体和液体等多个组分构成。流体熔融包裹体的存在表明在绿柱石矿物的形成过程中, 岩浆和岩浆水这两个不混溶相是共存的; 而流体熔融包裹体的出现, 更进一步暗示了成矿流体在此过程中发生了不混溶作用。

5.2 含铍伟晶岩成因

前人研究表明伟晶岩的形成主要有两种方式:

(1)花岗质岩浆的分离结晶作用; (2)地壳或地幔岩

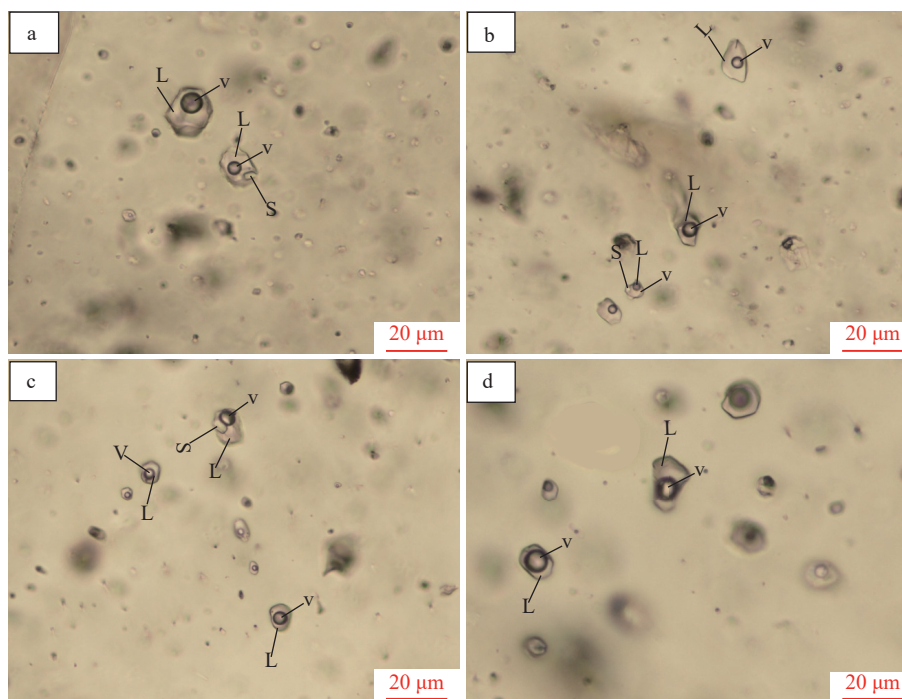


图 13 包裹体沸腾证据(L—液相; V—气相; S—子矿物)

a, b, c—含子晶三相包裹体与富液相两相包裹体共存; d—富气相两相包裹体与富液相两相包裹体共存

Fig.13 Boiling evidences of the inclusions (L—Liquid phase; V—Gas phase; S—Subcrystal)

a, b, c—Three-phase inclusions with subcrystal coexist with two-phase inclusions rich with liquid phase, d—The two-phase inclusions rich with gas phase coexist with two-phase inclusions rich with liquid phase

石的部分熔融(冉子龙和李艳军, 2021)。前者是由花岗岩体在结晶过程中残留下来的花岗熔体, 通过围岩中的裂隙和断层向上渗入, 最终在岩体顶部集中形成伟晶岩脉; 后者是直接通过部分熔融形成。据 Müller et al. (2017) 研究表明, 伟晶岩群与相邻花岗岩侵入体在空间上的重合性不一定意味着它们之间有成因联系, 反而伟晶岩与花岗岩可能存在较大的年龄差距; 在这种情况下, 伟晶岩可以直接通过深熔作用(部分熔融)形成, 而不一定需要花岗岩作为母岩; 比如 Sveconorwegian 省的 Hidra、Evje-Iveland、Froland、Haugesund 和 Halland 伟晶岩是在造山环境中由深熔作用形成。Lü et al. (2018) 研究表明, 在弧前伸展环境下, 通过减压和有限的热能以及幔源物质的注入, 可以促进变质沉积岩的低程度部分熔融, 从而导致伟晶岩的形成。因此, 花岗岩的结晶分异并不是伟晶岩形成和元素迁移的唯一方式, 还可以通过部分熔融和深熔作用形成。部分熔融形成的伟晶岩有以下共同点: 直接来源于地壳岩石部分熔融或低比例熔融形成的小体积熔体(深熔熔体), 因稀有金属元素(如 Li、Be、Nb、Ta)在熔融过程中优先进入熔体相而显著富集; 没有母岩伴生、与混合岩共生, 没有同期花岗岩体出露、通常为强过铝质矿物组合、与围岩一致的同位素组成。部

分熔融伟晶岩的形成依赖于源岩预富集、低比例熔融和缓慢结晶三要素, 是造山带折返阶段地壳深熔的典型产物(周晋捷等, 2024; 周起凤等, 2023; 于萌, 2020)。对部分熔融形成伟晶岩的识别, 需综合野外产状、矿物地球化学与同位素示踪等多维度证据。

瓦渣钨铍矿床位于滇东南老君山岩体的东北接触带, 其围岩为中粗粒二云母花岗岩, 其锆石 U-Pb 年龄为 83.3~87.5 Ma(冯佳睿等, 2010; Feng et al., 2013; Zhao et al., 2017)。该期岩体与本文伟晶岩在形成时代上具有较大差距((187.9±1.4)Ma), 因此排除伟晶岩是该花岗岩结晶分异残余岩浆固结的产物。

对老君山矿集区内的花岗岩和伟晶岩年龄进行统计表明, 形成时代与瓦渣伟晶岩((187.9±1.4)Ma)同期或更早的花岗岩体有: 团田花岗岩、南捞花岗岩、老城坡花岗岩、南温河花岗岩, 其形成时代分别为 434~438Ma, 430 Ma、426~427 Ma、405~444 Ma(表 6; 徐伟, 2007; 徐斌, 2015; 潘锦波等, 2015); 所以, 如果瓦渣伟晶岩的形成与花岗岩的分异有关, 那可能与这些时代较早的花岗岩(团田、南捞、老城坡、南温河)具有一定的成因联系。

为了进一步探讨瓦渣伟晶岩是否与这些花岗岩有成因联系, 本文从地球化学特征方面对这些花岗岩与伟晶岩进行了对比。结果显示, 团田、南捞

表 6 老君山地区花岗岩及伟晶岩脉同位素年龄统计

Table 6 Isotopic ages of the granites and pegmatites in Laojunshan area

矿床名称及位置	岩石类型	测试对象	年龄/Ma	测试方法	资料来源
老君山(茶叶山—上阳坡一线及保良街)	马鹿塘伟晶岩脉	锆石	209±2.0		
	黄瓜坡伟晶岩脉	锆石	381.2±3.3	LA-ICP-MS U-Pb	张振发等, 2018
	滑石板伟晶岩脉	锆石	389.4±4.9		
保良街伟晶岩	白云母钠长石伟晶岩	白云母	141	Ar-Ar	
	黑云闪长片麻岩	黑云母	112	Ar-Ar	李建康等, 2013
上阳坡伟晶岩	白云母钠长石伟晶岩	白云母	144	Ar-Ar	
	黑云斜长片麻岩	黑云母	121	Ar-Ar	
都龙矿床	矽卡岩	锡石	80	TIMS U-Pb	刘玉平等, 2007
瓦渣钨铍矿床	中粗粒二云二长花岗岩	锆石	83.3±1.5	SHRMP U-Pb	冯佳睿等, 2010
			88.9~93.9	LA-ICP-MS U-Pb	刘艳宾等, 2014
			84.3~91.7	LA-ICP-MS U-Pb	李进文等, 2013
			86.9	LA-ICP-MS U-Pb	刘玉平等, 2007
			86.02~86.72	LA-ICP-MS U-Pb	Feng et al., 2013
老君山岩体	花岗岩	锆石	434~438		
			430		
			426~427		
			90.1±0.7	LA-ICP-MS U-Pb	徐斌, 2015
老君山地区早古生代花岗岩	团田单元浅灰色片麻状中细粒花岗岩	锆石	434~438		
	南崆单元花岗岩片麻岩	锆石	430		
	老城坡单元片麻状黑云母二长花岗岩	锆石	426~427		
老君山地表花岗岩及都龙矿区钻孔	中粗粒花岗岩	锆石	90.1±0.7		
	中细粒花岗岩	锆石	89.7±0.8		
	花岗斑岩	锆石	86±0.5		
南温河	花岗岩	锆石	405~444	SHRMP U-Pb、 TIMS U-Pb	徐伟, 2007

花岗岩、南温河均为强过铝质,老城坡花岗岩为弱过铝质(图 10a),瓦渣伟晶岩为准铝质-过铝质过渡类型岩浆岩;南温河花岗岩属于钙碱性-高钾钙碱性系列,南捞、团田、老城坡花岗岩属于高钾钙碱性系列,而瓦渣伟晶岩属于低钾(拉斑)玄武岩-钾玄武岩系列(10b)。从球粒陨石标准稀土配分图解来看(图 11a),虽然这些花岗岩和伟晶岩的配分模式类似,均表现出轻稀土富集、重稀土亏损的特点;但是,花岗岩样品具有明显的负 Eu 异常,而伟晶岩样品为明显的正 Eu 异常及 Ce 负异常。从原始地幔标准化蛛网图解来看(图 11b),南温河、团田、南捞、老城坡花岗岩均富集 Rb、U 和 Pb,亏损 Sr、Eu、Nb 及 Ti;而伟晶岩样品富集 Rb、Th、U、Ta、Pb、P、Zr、Hf 等元素,亏损 Ba、K、Nb、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Ti 等元素。此外,瓦渣伟晶岩富含挥发分,具有较高的硅、富铝、富碱,且具有铝饱和性特征,这表明伟晶岩在形成过程中经历了强烈的演化和分异,且具有壳源特征。通过对比岩体的年代学和全岩地球化学特征,流体包裹体特征,以及花岗岩与伟晶岩锆石全岩 Nd 同位素图解,表明花岗岩与伟晶岩源于不同源区(图 12),结合本文 Nd 同位素特征及以上分析,我们认为瓦渣含铍伟晶岩可能与花岗岩无直接成因联系,可能形成于陆壳物质的部分熔融。

综上所述,笔者认为瓦渣含铍伟晶岩可能与花岗岩无直接成因联系,而是形成于陆壳物质的部分熔融。这也与张振发等(2018)提出滇东南老君山地区伟晶岩形成于碰撞后伸展构造背景下古老沉积岩的减压熔融过程相一致。

6 结论

通过对瓦渣地区伟晶岩进行锆石 U-Pb 年代学、包裹体、全岩主微量元素以及 Sr-Nd 同位素的研究,得出以下结论:

(1)瓦渣铍矿床绿柱石中流体包裹体由富液相的两相水溶液包裹体、富气相的两相水溶液包裹体、含两相水溶液包裹体及含子晶的三相流体包裹体组成,成矿流体为中温、中盐度的 $\text{NaCl-H}_2\text{O-CO}_2\text{-CH}_4\pm\text{N}_2$ 体系。

(2)伟晶岩的锆石 U-Pb 年龄为 $(187.9\pm 1.4)\text{ Ma}$,表明瓦渣矿区的伟晶岩脉形成于早侏罗世。

(3)伟晶岩具有高硅、富铝、富碱的特征,Nd 同位素具有富集特征;含铍伟晶岩由陆壳物质部分熔融形成,在成矿过程中发生了流体不混溶作用。

致谢: 在野外工作中得到了云南地质矿产勘查开发局第二地质大队杨昌毕总工程师、麻栗坡金玮矿产有限公司贺军瑛董事长的帮助;在测试过程中得到了昆明理工大学管申进老师的帮助;两位审稿专家给出了非常好的修改意见;在此一并致谢。

注释

①云南省地质矿产勘查开发局第二地质大队. 2017. 云南省麻栗坡县瓦渣钨矿资源储量核实报告[R]. 1-116.

References

- Agrawal A, Cronin J P, Agrawal A, Tonazzi J C, Adams L, Ashley K, Brisson M J, Duran B, Whitney J, Burrell A K. 2008. Extraction and optical fluorescence method for the measurement of trace beryllium in soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 42(6): 2066-2071.
- Anders E, Grevesse N. 1989. Abundances of the elements: Meteoritic and solar[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53: 197-214.
- Barton M, Young S. 2002. Non-pegmatitic deposits of beryllium: Mineralogy, geology, phase equilibria and origin[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 50: 591-691.
- Bulnaev K B. 2006. Fluorine-beryllium deposits of the Vitim Highland, western Transbaikalian region: Mineral types, localization conditions, magmatism, and age[J]. *Geology of Ore Deposits*, 48(4): 277-289.
- Cerný P. 2002. Mineralogy of beryllium in granitic pegmatites[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 50(1): 405-444.
- Chen Zizhan, Guo Ranqi, Han Mei, Li Fangqin. 2023. Risk analysis of beryllium resource supply in China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 44(2): 369-377 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Yanbo, Mao Jingwen, Xie Guiqing, Chen Maohong, Zhao Caisheng, Yang Zongxi, Zhai Haijie, Li Xiangqian. 2008. Preliminary study of the petrogenesis of Laochang-Kafang granite in the Gejiu area, Yunnan province: Constraints from geochemistry and zircon U-Pb dating[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1478-1493 (in Chinese with English abstract).
- Damdinova L B, Smirnov S Z, Damdinov B B. 2015. Formation conditions of high-grade beryllium ore at the Snezhnoe deposit, Eastern Sayan[J]. *Geology of Ore Deposits*, 57(6): 454-464.
- Feng J, Mao J, Pei R. 2013. Ages and geochemistry of Laojunshan granites in southeastern Yunnan, China: Implications for W-Sn polymetallic ore deposits[J]. *Mineralogy & Petrology*, 107(4): 573-589.

- Feng Jiarui, Mao Jingwen, Pei Rongfu, Zhou Zhenhua, Yang Zhongxi. 2010. SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of Laojunshan granite intrusion from the Wazha tungsten deposit, Yunnan Province and their implications for petrogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 845-857 (in Chinese with English abstract).
- Frezzotti M L, Tecce F, Casagli A. 2012. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 112: 1-20.
- Grew E S, Hazen R M. 2014. Beryllium mineral evolution[J]. *American Mineralogist*, 99(5/6): 999-1021.
- Grew E S. 2002. Mineralogy, petrology and geochemistry of beryllium: An introduction and list of beryllium minerals[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 50(1): 1-76.
- Guan Junlei, Geng Quanru, Peng Zhimin, Zhang Zhang, Wang Guozhi, Chen Yuanyuan. 2016. Petrology, petrochemistry and zircon U-Pb dating and Hf isotope features of Xiamari granites in Tanggula magmatic belt, Qinghai-Tibet plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(2): 304-333 (in Chinese with English abstract).
- Hall D L, Sterner S M, Bodnar R J. 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions[J]. *Economic Geology*, 83(1): 197-202.
- Hanson S L, Zito G. 2019. Beryllium mineralization in pegmatites and quartz dikes of Mount Rosa Complex Area, Colorado front range, Colorado, USA beryllium mineralization in Mount Rosa Complex Area[J]. *The Canadian Mineralogist*, 57(5): 757-759.
- Hu Zhikang. 2019. Fluid Inclusions Features and Genesis of Beryls from Cuonadong Gneiss Dome, Southern Tibet [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1-78 (in Chinese with English abstract).
- Huang Wenqing, Shui Ting, Ni Pei. 2017. Fluid inclusion studies on emeralds from Malipo area, Yunnan Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 37(1): 75-83 (in Chinese with English abstract).
- Kol'Tsov V Y, Yudina T B, Azarova Y V, Semenov A A, Lizunov A V, Lesina I G. 2017. Comparative geological and mineral-petrological analysis of ore-bearing rock in lithium and beryllium deposits for modeling the behavior of ore minerals during processing[J]. *Atomic Energy*, 122(2): 1-6.
- Li Dongxu, Xu Shunshan. 2000. Rotation-shearing genesis of metamorphic core complex—Structural analysis if metamorphic core complex in Laojunshan, southeastern Yunnan Province[J]. *Geological Review*, 46(2): 113-119 (in Chinese with English abstract).
- Li H, Li J W, Algeo T J, Wu J H, Cisse M. 2018. Zircon indicators of fluid sources and ore genesis in a multi-stage hydrothermal system: The Dongping Au deposit in North China[J]. *Lithos*, 314: 463-478.
- Li Jiankang, Wang Denghong, Li Huaqin, Chen Zhenghui, Mei Yuping. 2013. Late Jurassic-Early Cretaceous mineralization in the Laojunshan ore concentration area, Yunnan Province[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geoscience*, 38(5): 1023-1026 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Zou Tianren, Wang Denghong, Ding Xin. 2017. A review of beryllium metallogenic regularity in China[J]. *Mineral Deposits*, 36(4): 951-978 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinwen, Pei Rongfu, Wang Yonglei, She Hongquan, Feng Chengyou, Guo Zhijun, Wang Haolin, Xu Ke. 2013. Isotopic chronological studies of Dulong tin-zinc deposit in Yunnan Province[J]. *Mineral Deposits*, 32(4): 767-782 (in Chinese with English abstract).
- Li Na, Gao Aihong, Wang Xiaoning. 2019. Global beryllium resource supply and demand situation and suggestions[J]. *China Mining*, 28(4): 69-73 (in Chinese with English abstract).
- Li Zaihui, Tang Fawei, Lin Shiliang, Cong Feng, XieE Tao, Zou Guangfu. 2014. Zircon LA-ICPMS U-Pb geochronology of the beryl-bearing pegmatite and its geological significance, western Yunnan, southwest China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(2): 554-565 (in Chinese with English abstract).
- Linnen R L, Lichtervelde M V, Cerny P. 2012. Granitic pegmatites as sources of strategic metals[J]. *Elements*, 8(4): 275-280.
- Liu Tao, Tian Shihong, Wang Dengong, Zhang Yujie, Li Xianfang, Hou Kejun, Jieken-Kalimuhan, Zang Zhongli, Wang Yongqiang, Zhao Yue, Qin Yan. 2020. Genetic relationship between granite and pegmatite in Kalu'an hard-rock-type lithium deposit in Xinjiang: Results from zircon U-Pb dating, Hf-O isotopes and whole rock geochemistry[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(11): 3293-3320 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yanbin, Mo Xuanxue, Zhang Da, Que Chaoyang, Di Yongjun, Pu Xingming, Cheng Guoshun, Ma Huihui. 2014. Petrogenesis of the late Cretaceous granite discovered in the Laojunshan region, southeastern Yunnan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3271-3286 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yuping, Li Zhengxiang, Li Huimin, Guo Liguang, Xu Wei, Ye Lin, Li Chaoyang, Pi Daohui. 2007. U-Pb geochronology of cassiterite and zircon from the Dulong Sn-Zn deposit: Evidence for Cretaceous large-scale granitic magmatism and mineralization events in southeastern Yunnan Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 967-976 (in Chinese with English abstract).
- Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, Ou Guangxi, Shen Kun, Zhang Wenhui. 2014. Fluid Inclusion [M]. Beijing: Science Press, 1-419 (in Chinese).
- Lü Z H, Zhang H, Tang Y, Liu Y L, Zhang X. 2018. Petrogenesis of syn-orogenic rare metal pegmatites in the Chinese Altai: Evidences from geology, mineralogy, zircon U-Pb age and Hf isotope[J]. *Ore Geology Reviews*, 95: 161-181.
- Lyalina L, Selivanova E, Zozulya D, Ivanyuk G. 2018. Beryllium mineralogy of the Kola Peninsula, Russia—A Review[J]. *Minerals*, 9(1): 12.
- Maas R, Grew E S, Carson C J. 2015. Isotopic constraints (Pb, Rb-Sr, Sm-Nd) on the sources of early Cambrian pegmatites with boron

- and beryllium minerals in the Larsemann Hills, Prydz Bay, Antartcticthe Canadian Mineralogist[J]. *The Canadian Mineralogist*, 53(2): 249–272.
- Malyukova N, Kim V, Tulyaev R. 2005. Zonation of polymetallic, rare-earth, molybdenum, zirconium, beryllium and tantalum–niobium mineralization in the Ak-Tyuz ore deposits (Northern Tien Shan) [C]// Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge. Berlin: Springer, 18–21.
- Müller R B. 2017. The sveconorwegian pegmatite province-Thousands of pegmatites without parental granites[J]. *The Canadian Mineralogist*, 55(2): 283–315.
- Pan Jinbo, Zhang Da, Que Chaoyang, Di Yongjun, Huang Kongwen, Bi Minfeng, Xu Jianzhen. 2015. Geochemistry and ziron U–Pb chronology of the Laochengpo gneissic granite in the southeast Yunnan Area and their implications [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(4): 795–803 (in Chinese with English abstract).
- Ran Zilong, Li Yanjun. 2021. Research advances on rare metal pegmatite deposits[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(2): 13–23 (in Chinese with English abstract).
- Ripp G S, Izbrodin I A, Rampilov M O, Tomilenko A A, Lastochkin E A, Posokhov V F. 2020. Relationship of F–Be mineralization to granites and syenites at the ermakovka deposit (western transbaikalia)[J]. *Geologica Acta*, 18: 1–13.
- Romer R L, Förster H J, Hahne K. 2012. Strontium isotopes — A persistent tracer for the recycling of Gondwana crust in the Variscan orogeny[J]. *Gondwana Research*, 22(1): 262–278.
- Schilling J, Bingen B, Skår Ø, Wenzel T, Markl G. 2015. Formation and evolution of the Høgtuva beryllium deposit, Norway[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 170: 1–21.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and Isotopic Systematics in Ocean Basalt: Implication for Mantle Composition and Processes[C]//Saunders A D, Norry M J. (eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*: Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345.
- Tian S, Hou Z, Mo X, Tian Y, Zhao Y, Hou K, Zhang Y. 2020. Lithium isotopic evidence for subduction of the Indian lower crust beneath southern Tibet[J]. *Gondwana Research*, 77: 168–183.
- Wang Denghong, Xu Zhigang, Sheng Jifu, Zhu Mingyu, Xue Jue, Yuan Zhongxin, Bai Ge, Qu Wenjun, Li Huaqin, Chen Zhenghui, Wang Chenghui, Huang Fan, Zhang Changqin, Wang Yonglei, Ying Lijuan, Li Houmin, Gao Lan, Sun Tao, Fu Yong, Li Jiankang, Wu Guang, Tang Juxing, Feng Chengyou, Zhao Zheng, Zhang Daquan. 2014. Progress on study of regularity of major mineral resources and regional metallogenic regularity in China: A review[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2176–2191 (in Chinese with English abstract).
- Wu Changnian, Zhu Jinchu, Liu Changshi, Yang Shengzu, Zhu Bingyu, Ning Guangjin. 1995. The physic-chemical conditions of formation of beryl in the Kuwei pegmatite, Altay, Xinjiang[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 15(3): 346–351 (in Chinese with English abstract).
- Wu Runqiu, Rao Chan, Wang Qi, Zhang Di. 2020. Electron probe microanalysis of the key metal beryllium[J]. *Chinese Science Bulletin*, 65(20): 2161–2168 (in Chinese).
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Mineralogical study of zircon origin and constraint interpretation for the U–Pb ages of zircons[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589–1604 (in Chinese).
- Xu Bin. 2015. Muti-stage Magmatism in Laojunshan of SE Yunnan, China: Geochemistry, Geodynamic Implication and Related Mineralization [D]. Nanjing: Nanjing University, 1–140 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wei. 2007. A Preliminary Study on the Chronology and Geochemistry of the Nanwenhe Granite in Southeastern Yunnan [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, CAS (in Chinese with English abstract).
- Xu Xingwang, Hong Tao, Li Hang, Niu Lei, Ke Qiang, Chen Jianzhong, Liu Shanke, Zhai Mingguo. 2020. Concept of high-temperature granite–pegmatite Li–Be metallogenic system with a primary study in the middle Altyn–Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(12): 3572–3592 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhe, Zhang Fushen, Zhang Fangrong, Zhang Yong, Zhou Yu, Xu Jin, Huang Chengwei, He Bin, Long Lixue. 2024. U–Pb dating of monazite from the beryllium mineralized pegmatite and its geological significance in the Guyangzhai area at the southern margin of Jiuling, Jiangxi[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 47(1): 13–21.
- Yu Meng. 2020. Mineral Genesis Study of Migmatite–granite–pegmatite in Convergent Continental Margins and its Constraints on Petrogenesis [D]. Anhui: University of Science and Technology of China, 1–150 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shitao, Feng Minggang, Wang Houqiang, Lü Wei, Yang Ming. 1999. Geological features and genesis of emerald deposit in Malipo County, Yunnan Province, China[J]. *Geological Science and Technology information*, 18(1): 50–54 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhenfa, Zhang Hui, Lü Zhenghang, Yang Hailin, Yu Wenxiu. 2018. Zircon U–Pb geochronology and the geological significance of pegmatites from the Laojunshan area, Southeastern Yunnan[J]. *Geochimica*, 47(1): 33–47 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Z, Hou L, Ding J, Zhang Q, Wu S. 2017. A genetic link between Late Cretaceous granitic magmatism and Sn mineralization in the southwestern South China Block: A case study of the Dulong Sn–dominant polymetallic deposit[J]. *Ore Geology Reviews*, 93: 268–289.
- Zhou Jinjie, Lü Zhenghang, Liu Kun, Tang Yong, Zhang Hui. 2024. Enrichment characteristics of rare metals in the initial magma of anatectic pegmatite[J]. *Acta Geologica Sinica*, 98(5): 1507–1526.
- Zhou Qifeng, Qin Kezhang, Zhu Liqun, Zhao Junxing. 2023. Discussion on the genesis of granitic pegmatites: Magmatic

differentiation versus anatexis[J]. *Earth Science Frontiers*, 30(5): 26–39.

附中文参考文献

- 陈子瞻, 郭冉启, 韩梅, 李芳琴. 2023. 中国铍资源供给风险分析[J]. *地球学报*, 44(2): 369–377.
- 程彦博, 毛景文, 谢桂青, 陈懋弘, 赵财胜, 杨宗喜, 赵海杰, 李向前. 2008. 云南个旧老厂—卡房花岗岩体成因初探: 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学约束[J]. *地质学报*, 81(11): 1478–1493.
- 冯佳睿, 毛景文, 裴荣富, 周振华, 杨宗喜. 2010. 云南瓦渣钨矿区老君山花岗岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及成因探讨[J]. *岩石学报*, 26(3): 845–857.
- 关俊雷, 耿全如, 彭智敏, 张璋, 王国芝, 陈园园. 2016. 西藏唐古拉岩浆岩带夏玛日花岗岩体的岩石学、岩石地球化学、锆石 U-Pb 测年及 Hf 同位素组成[J]. *地质学报*, 90(2): 304–333.
- 胡志康. 2019. 藏南绿柱石的包裹体研究及成因探讨[D]. 北京: 中国地质大学, 1–78.
- 黄文清, 水汀, 倪培. 2017. 云南麻栗坡祖母绿的流体包裹体研究[J]. *矿物学报*, 37(1): 75–83.
- 李东旭, 许顺山. 2000. 变质核杂岩的旋扭成因——滇东南老君山变质核杂岩的构造解析[J]. *地质评论*, 46(2): 113–119.
- 李建康, 王登红, 李华芹, 陈郑辉, 梅玉萍. 2013. 云南老君山矿集区的晚侏罗世—早白垩世成矿事件[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 38(5): 1023–1026.
- 李建康, 邹天人, 王登红, 丁欣. 2017. 中国铍矿成矿规律[J]. *矿床地质*, 36(4): 951–978.
- 李进文, 裴荣富, 王永磊, 余宏全, 丰成友, 郭志军, 王浩琳, 徐可. 2013. 云南都龙锡铋矿区同位素年代学研究[J]. *矿床地质*, 32(4): 767–782.
- 李娜, 高爱红, 王小宁. 2019. 全球铍资源供需形势及建议[J]. *中国矿业*, 28(4): 69–73.
- 李再会, 唐发伟, 林仕良, 丛峰, 谢韬, 邹光富. 2014. 滇西含绿柱石伟晶岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 44(2): 554–565.
- 刘涛, 田世洪, 王登红, 张玉洁, 李贤芳, 侯可军, 杰肯·卡里木汗, 张忠利, 王永强, 赵悦, 秦燕. 2020. 新疆卡鲁安硬岩型锂矿床花岗岩与伟晶岩成因关系: 锆石 U-Pb 定年、Hf-O 同位素和全岩地球化学证据[J]. *地质学报*, 94(11): 3293–3320.
- 刘艳宾, 莫宣学, 张达, 阙朝阳, 狄永军, 蒲兴明, 程国顺, 马慧慧. 2014. 滇东南老君山地区晚白垩世花岗岩的成因[J]. *岩石学报*, 30(11): 3271–3286.
- 刘玉平, 李正祥, 李惠民, 郭利果, 徐伟, 叶霖, 李朝阳, 皮道会. 2007. 都龙锡铋矿床锡石和锆石 U-Pb 年代学: 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩-成矿事件[J]. *岩石学报*, 23(5): 967–976.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 2004. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 1–419.
- 潘锦波, 张达, 阙朝阳, 狄永军, 黄孔文, 毕珉烽, 徐建珍. 2015. 滇东南老城坡片麻状花岗岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及其意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 34(4): 795–803.
- 冉子龙, 李艳军. 2021. 伟晶岩型稀有金属矿床成矿作用研究进展[J]. *地质科技通报*, 40(2): 13–23.
- 王登红, 徐志刚, 盛继福, 朱明玉, 徐珏, 袁忠信, 白鸽, 屈文俊, 李华芹, 陈郑辉, 王成辉, 黄凡, 张长青, 王永磊, 应立娟, 李厚民, 高兰, 孙涛, 付勇, 李建康, 武广, 唐菊兴, 丰成友, 赵正, 张大权. 2014. 全国重要矿产和区域成矿规律研究进展综述[J]. *地质学报*, 88(12): 2176–2191.
- 吴润钦, 饶灿, 王琪, 张迪. 2020. 关键金属铍的电子探针分析[J]. *科学通报*, 65(20): 2161–2168.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 49(16): 1589–1604.
- 吴长年, 朱金初, 刘昌实, 杨升祖, 朱炳玉, 宁广进. 1995. 新疆阿尔泰库威伟晶岩中绿柱石形成的物理化学条件[J]. *矿物学报*, 15(3): 346–351.
- 徐斌. 2015. 滇东南老君山地区多期岩浆作用地球化学及成岩成矿背景研究[D]. 南京: 南京大学, 1–140.
- 徐伟. 2007. 滇东南南温河花岗岩年代学和地球化学初步研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.
- 徐兴旺, 洪涛, 李杭, 牛磊, 柯强, 陈建中, 刘善科, 翟明国. 2020. 初论高温花岗岩—伟晶岩锂铍成矿系统: 以阿尔金中段地区为例[J]. *岩石学报*, 36(12): 3572–3592.
- 徐喆, 张福神, 张芳荣, 张勇, 周渝, 徐进, 黄成伟, 贺彬, 龙立学. 2024. 江西九岭南缘古阳寨地区铍矿化伟晶岩独居石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *东华理工大学学报 (自然科学版)*, 47(1): 13–21.
- 于萌. 2020. 汇聚大陆边缘混合岩—花岗岩—伟晶岩矿物成因研究及其对岩石成因的制约[D]. 安徽: 中国科学技术大学, 1–150.
- 张传昱, 曹晓民, 李文昌, 唐忠, 余海军, 陈曹军, 程涌, 李蓉. 2021. 云南省铍矿床成矿规律初探[J]. *岩石矿物学杂志*, 40(2): 452–464.
- 张世涛, 冯明刚, 王厚强, 吕伟, 杨明. 1999. 云南省麻栗坡县祖母绿矿区的地质特征及成因初探[J]. *地质科技情报*, 18(1): 50–54.
- 张振发, 张辉, 吕正航, 杨海林, 于文修. 2018. 滇东南老君山地区伟晶岩年代学研究及其地质意义[J]. *地球化学*, 47(1): 33–47.
- 周晋捷, 吕正航, 刘堃, 唐勇, 张辉. 2024. 深熔成因伟晶岩初始岩浆中稀有金属富集特征[J]. *地质学报*, 98(5): 1507–1526.
- 周起凤, 秦克章, 朱丽群, 赵俊兴. 2023. 花岗伟晶岩成因探讨: 岩浆分异与深熔[J]. *地学前缘*, 30(5): 26–39.