



引文格式: 王利波, 王威, 姚宗全, 等. 新疆和田县 509 道班西锂铍稀有金属矿床石榴子石特征及其岩浆演化意义 [J]. 西北地质, 2025, 58(4): 223-233. DOI: 10.12401/j.nwg.2025016

Citation: WANG Libo, WANG Wei, YAO Zongquan, et al. Characteristics of Garnet in the 509 Daobaxi Lithium Beryllium Rare Metal Deposits in Hotan County, Xinjiang and Indicative Significance of Magmatic Evolution[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 223-233. DOI: 10.12401/j.nwg.2025016

新疆和田县 509 道班西锂铍稀有金属矿床石榴子石特征及其岩浆演化意义

王利波^{1,2,3}, 王威^{1,3}, 姚宗全^{1,2,*}, 李永⁴, 陈川¹, 王涵¹

(1. 新疆大学地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 中亚地质矿产信息集成自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830047; 3. 新疆自然资源与生态环境研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830000; 4. 新疆有色地勘局地质矿产研究院, 新疆 乌鲁木齐 830099)

摘要: 新疆和田县大红柳滩 509 道班西锂铍稀有金属矿是近年发现的超大型锂多金属矿床。为了研究矿区花岗伟晶岩的岩浆分异演化过程, 建立岩浆演化各阶段和稀有金属成矿的矿物学指标, 笔者利用电子探针原位主量元素分析和自动矿物分析系统 (TIMA) 对矿区内伟晶岩和地层中的石榴子石展开研究。结果表明, 矿区内花岗伟晶岩中的石榴子石为岩浆成因, 属于铁铝榴石-锰铝榴石固溶体系列, 变质砂岩中的石榴子石为变质成因。区内伟晶岩中的石榴子石随着岩浆演化程度的增加而逐渐富 Mn, 高 Mn 含量石榴子石 (MnO > 22.5%) 可以作为该地区高分异矿化伟晶岩的标志。因电气石结晶分异的作用下使得石榴子呈现从核心到边缘 Mn 含量增加、Fe 含量降低的现象。综合研究表明伟晶岩的演化顺序为白云母花岗伟晶岩-白云母电气石花岗伟晶岩-贫矿(锂)伟晶岩。

关键词: 伟晶岩; 石榴子石; 主量元素; 509 道班西; TIMA

中图分类号: P618.71; P611.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6248(2025)04-0223-11

Characteristics of Garnet in the 509 Daobaxi Lithium Beryllium Rare Metal Deposits in Hotan County, Xinjiang and Indicative Significance of Magmatic Evolution

WANG Libo^{1,2,3}, WANG Wei^{1,3}, YAO Zongquan^{1,2,*}, LI Yong⁴, CHEN Chuan¹, WANG Han¹

(1. College of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, China University, Urumqi 830047, Xinjiang, China; 2. Key Laboratory of Central Asia Geological and Mineral Information Integration Autonomous Region, Urumqi 830047, Xinjiang, China; 3. The Research Center Resource and Environment of Xinjiang, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 4. Institute of Geology and Mineral Resources, Xinjiang Nonferrous Geological Exploration Bureau, Urumqi 830099, Xinjiang, China)

Abstract: The West Kunlun Orogenic Belt of the 509 Daobaxi deposit is a super-large Li-Be rare metal discov-

收稿日期: 2023-12-14; 修回日期: 2025-02-05; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家重点研发计划“西昆仑-阿尔金锂等稀有金属矿综合三维模型应用示范”(2021YFC2901904-3)和新疆维吾尔自治区天山英才项目“吐哈探区深层海相石炭系火山岩成藏机理与高效发现技术”(2023TSYCY0002)联合资助。

作者简介: 王利波(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事锂铍稀有金属矿床成因研究。E-mail: 1761117866@qq.com。

* 通讯作者: 姚宗全, (1989-), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 从事石油地质、沉积储层理论研究。E-mail: yzq@xju.edu.cn。

ered in recent years. In order to study the magmatic differentiation and evolution process of granite pegmatites in the mining area, and establish the mineralogical indexes of each stage of magmatic evolution and rare metal mineralization, this paper used electron probe in-situ principal element analysis and automatic mineral analysis system (TIMA) to study various types of garnet in the mining area. The results show that the garnet in the granite-pegmatite in the mining area is of magmatic origin, belonging to the almandine-spessartine solid-solution, and the garnet in the metamorphic sandstone is of metamorphic origin. The garnet in the area is gradually enriched with the deepening of magma evolution. High-Mn garnet ($MnO > 22.5\%$) can serve as a marker for highly differentiated mineralised pegmatites in the region. Due to tourmaline crystal differentiation, Mn content increases and Fe content decreases from core to edge of pomegranate. The evolutionary sequence of pegmatite is Muscovite granite-pegmatite, Muscovite tourmaline granite-pegmatite and ore-bearing pegmatite.

Keywords: pegmatite; garnet; major elements; 509 -Daobanxi; TIMA

锂铍等稀有金属已经被广泛运用于航空航天、新能源、电子等高科技产业,具有十分重要的意义。大红柳滩地区作为中国重要的花岗伟晶岩稀有金属成矿区(任广利 2022; 孔会磊等, 2023),区内发育着大量花岗伟晶岩,使其成为研究花岗伟晶岩岩浆演化的理想场所。前人已经对大红柳滩地区中的花岗伟晶岩展开了大量研究,在成岩成矿时代、岩体类型以及流体演化等方面取得了较好的进展(王登红等 2005; 乔耿彪等, 2015; 魏小鹏, 2017; 李侃等, 2019; 凤永刚等, 2019; 王核等, 2020, 2021; 谭克彬, 2021; 王威等, 2022)。

509道班西矿床中的伟晶岩是由岩浆结晶分异和热液交代共同作用形成的,成矿物质主要源自二长花岗岩,成矿年龄为晚三叠世,约为190~210 Ma(谭克彬, 2021; 何蕾等, 2023); 贫矿(锂)伟晶岩是由结晶分异晚期残余热液沿着构造裂隙填充、交代形成的(谭克彬, 2021; 唐俊林等, 2022)。何蕾等(2023)研究认为,大红柳滩白龙山矿床中贫矿伟晶岩源自贫水富含硅酸盐体系,富矿伟晶岩源自富水贫硅酸盐熔体体系(Fan et al., 2020)。大红柳滩雪风岭矿床其伟晶岩空间分带由北向南为石英脉、贫矿伟晶岩、石英钠长石白云母伟晶岩脉、块状长石伟晶岩和黑云母电气石伟晶岩脉(王核等, 2020)。成矿母岩(二云母二长花岗岩)来源存在争议。部分学者认为,二云母二长花岗岩是黑云母二长花岗岩(变质砂岩与中基性岩熔融形成的岩浆结晶分异)逐渐演化形成的(唐俊林等, 2022); 部分学者认为,二长二云母花岗岩和黑云母二长花岗岩来自不同源区,二长二云母花岗岩源自地壳部分熔融(何蕾等, 2023)。

稀有金属矿化一般需要经历岩浆-岩浆热液-热

液3个阶段,不同的岩浆演化程度对应着不同的稀有金属矿化种类和强度(Cerný et al., 1985; Raimbault et al., 1995; London, 2008; Cuney et al., 2014; 姜鹏飞等, 2023)。目前,该地区中岩浆演化方面研究较少,而石榴子石具有良好的贯通性,常以副产物的形式存在于花岗伟晶岩当中,对岩浆演化方面提供新的证据支撑(Miller et al., 1981; Manning, 1983; Harrison, 1988; 姜鹏飞等, 2023)。石榴子石常以端元组分的类质同象的混晶形式存在于自然界,其端元组分占比对于判断其成因类型和岩浆演化程度具有一定意义(Whitworth, 1992; Morgan et al., 1999),其特殊的结果使其具备吸附周围介质中的化学组分,因此在指示化学示踪、岩浆形成环境、地质年代学有着重要的意义(Gaspar et al. 2008; Geiger, 2013; 姜鹏飞等, 2023)。

石榴子石作为岩浆演化与成矿指示的标志矿物对于研究岩浆演化具有重大意义(姜鹏飞等, 2023),其化学组合可以指示稀有金属花岗伟晶岩演化过程。笔者分析区内稀有金属成矿特点和岩浆演化过程,旨在建立石榴子石对于稀有金属矿化和岩浆演化的矿物学指标。

1 区域地质背景

509道班西锂铍稀有金属矿床位于新疆和田县西南方向约180 km处,其大地构造位置位于西昆仑-哈喇昆仑造山带,隶属于巴颜喀拉山群的边缘裂陷带内,主要以二叠系、三叠系复理石沉积建造为主,其区域构造演化与原特提斯和古特提斯洋的消亡俯冲、印度板块与欧亚板块挤压碰撞以及喜马拉雅运动有关(肖

文交等, 2000; 潘桂棠等, 2001; 计文化等, 2007; 李荣社等, 2007; 董连慧等, 2010; 高一航等, 2023)。区域地层为三叠系巴颜喀拉山群(TB)、二叠系黄羊岭群(PH)、中元古界康西瓦岩群(P₁K)(图1b), 总体走向为NW-SE。由北向南将西昆仑造山带分为, 北昆仑、南昆仑、甜水海和哈喇昆仑4个地块(潘裕生, 1990; 乔耿彪等, 2015; 魏小鹏, 2017; 王核等, 2020, 2021; 谭克彬, 2021)。晚三叠世碰撞型侵入岩在巴颜喀拉山群中广泛发育, 围岩具有明显接触变质现象。侵入岩

的主要岩性为灰白色中粒含斑黑云母二长花岗岩和肉红色中细粒黑云母二长花岗岩(涂其军等 2019; 谭克彬, 2021; 王威等, 2022)。伟晶岩脉主要分布于晚三叠世二长花岗岩的外接触带上, 以脉群的形式分布于岩体边部(李侃等 2019; 王核等, 2020, 2021; 谭克彬, 2021; 王威等, 2022)。据不完全统计该地区伟晶岩脉七千余条, 主要矿物由钠长石、石英、斜长石、云母、石榴子石(少量)、电气石(少量)组成(周兵等, 2011; 谭克彬, 2021; 王威等, 2022)。

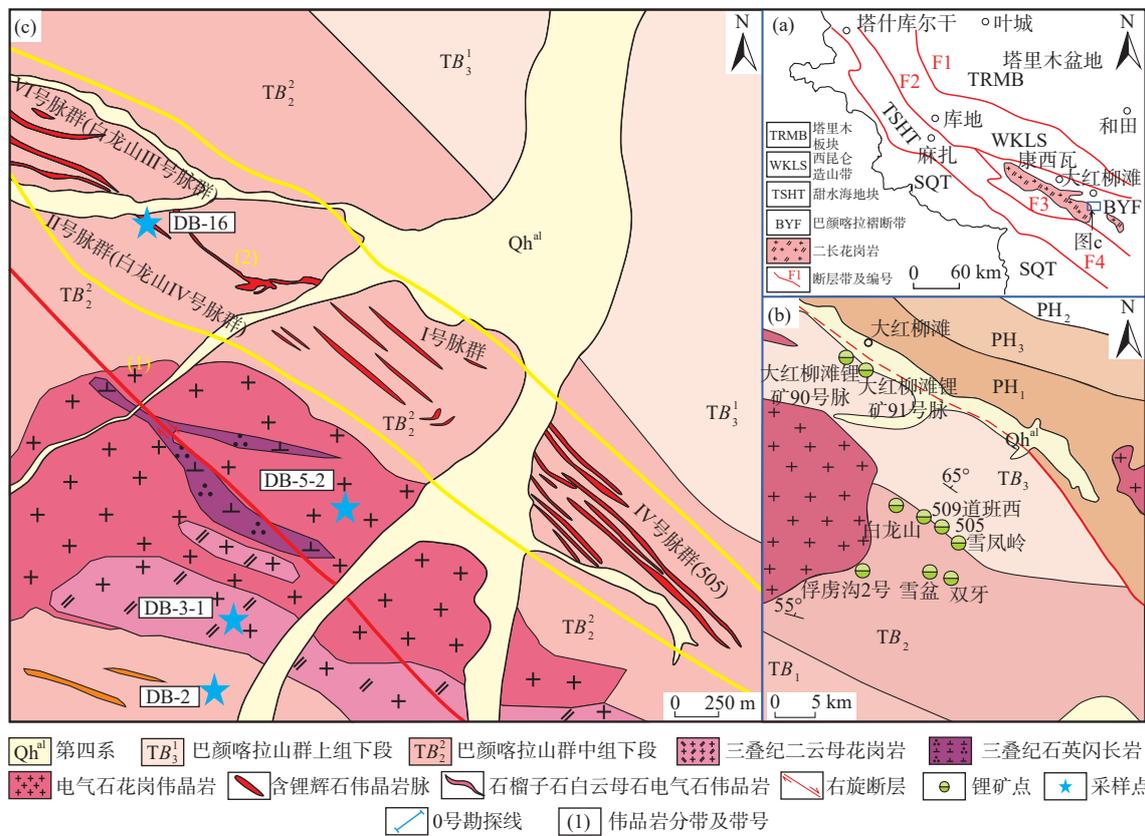


图1 西昆仑大地构造图(a)、大红柳滩区域地质图(b)和509道班西稀有金属矿床地质简图(c)(据王威等, 2022)
Fig. 1 (a) Geotectonic map of West Kunlun, (b) geological map of the Dahongliutan area, and (c) geological diagram of rare metal deposits in 509 Daobanxi

2 矿区地质背景

矿区地层为三叠系巴颜喀拉山群中组上段(TB₂²), 岩性为一套细粒碎屑岩类复理石建造。地层岩石片理广泛发育, 片理面上存在一些蚀变矿物。早期侵入体为晚三叠世中细粒石英闪长岩, 晚期侵入体为侏罗纪似斑状中粒黑云母二长花岗岩(彭海练等, 2018; 王威等, 2022)。受到大红柳滩-郭扎断裂和奇台达坂断裂的影响, 次级断裂破碎带广泛发育(彭海练等,

2018); 伟晶岩脉主要发育在康西瓦深大断裂南侧的大红柳滩断裂中的二云母二长花岗岩的外接触带上, 脉体走向与区域构造线基本一致(谭克彬, 2021); 贫矿(锂)伟晶岩主要位于二云母二长花岗岩外接触带0.5~1.5 km的范围内, 主要以切层产出, 少量以顺层产出, 其成矿年代为中生代(220~190 Ma)(谭克彬, 2021; 王威等, 2022); 不含矿伟晶岩位于二云母二长花岗岩0~500 m的范围内, 年龄为(209~213 Ma)。按照矿物组合可以划分为电气石钠长石石英伟晶岩脉, 锂辉石钠长石石英伟晶岩脉, 白云母锂辉石钠长

石伟晶岩脉(彭海练等, 2018; 谭克彬, 2021)。

3 样品采集与分析方法

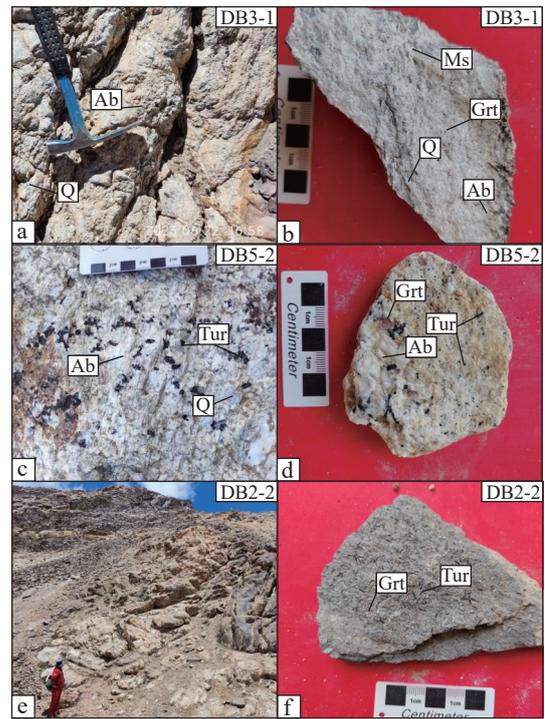
区内伟晶岩可以划分为白云母花岗伟晶岩、电气石花岗伟晶岩、贫矿(锂)伟晶岩 3 种伟晶岩, 其中不含矿伟晶岩为白云母花岗伟晶岩和电气石花岗伟晶岩。采样位置如(图 1)所示。将该区段的石榴子石分为白云母花岗伟晶岩中的石榴子石为独立和浸染状石榴子石(Grt I), 电气石花岗伟晶岩中的石榴子石(Grt II), 贫矿伟晶岩中的石榴子石(Grt III), 变质砂岩(Grt IV) 4 种类型。

区内不含矿伟晶岩和含矿伟晶岩的赋存地层为巴颜喀拉山群上段, 就空间位置来说白云母花岗伟晶岩和电气石花岗伟晶岩分布在成矿母岩 500 m 以内, 贫矿(锂)伟晶岩分布在成矿母岩 500~2 000 m 范围内。白云母花岗伟晶岩中矿物组合为石榴子石 3%、斜长石 25%、钾长石 38%、白云母 4%、石英 30%; 电气石花岗伟晶岩中的矿物组合为石英 35%、电气石 5%、斜长石 26%、条纹长石 30%、石榴子石 4%; 贫矿(锂)伟晶岩中的矿物组合为石榴子石 1%、石英 70%、钠长石 23%、白云母 2%、锂辉石 4%。

样品中的石榴子石 Grt I: 白云母花岗伟晶岩中的石榴子石为独立和浸染状石榴子石(图 2b), 不均匀分布。Grt II: 电气石花岗伟晶岩中的石榴子石为亚四面体(图 2d), 电气石交代石榴子石现象出现, 此类石榴子石的晶面出现裂纹(图 3b)。Grt III: 贫矿(锂)伟晶岩中的石榴子石并不常见石榴子石, 此类石榴子石为粗粒 0.8 mm, 的半自形他形晶, 良好的缝隙其中含有次生白云母(Zhang et al., 2022)。Grt IV: 靠近成矿母岩处的变质砂岩(图 2f), 矿物组合为石榴子石 5%, 黑云母 38%, 斜长石 48%, 石英 9%。

样品由南昌华地科技有限公司制片, 在长安大学成矿作用及其动力学实验室进行自动矿物快速分析系统(TIMAS)、电子探针(EMPA)的测试分析。样品在上机测试之前先按照提供的办法进行了镀碳, 将样品镀上尽量均匀厚度约 20 nm 的碳膜。实验仪器型号为 JXA-8230, 实验条件为: 加速电压为 15 kV, 电流为 20 nA, 束斑直径为 5 μm , 对 Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, P, Cr, Mn, Fe, Y, Zn, F, Cu, B, Ni 等元素进行分析测试, 其分析精度通常好于 0.10%。

矿物定量分析(TIMAS)系统(TIMAS XGHM)主体



a.白云母伟晶岩脉野外照片; b.白云母伟晶岩手标本照片; c.白云母电气石伟晶岩脉野外照片; d.白云母伟晶岩手标本照片; e.变质砂岩野外照片; f.变质砂岩手标本照片; Q.石英; Tur.电气石; Grt.石榴子石; Ab.钠长石

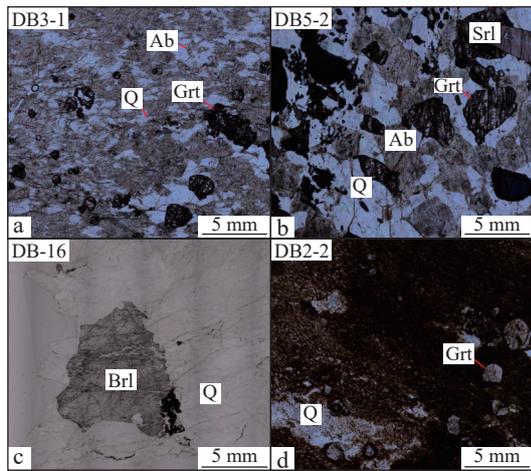
图2 样品宏观和手标本

Fig. 2 Field and hand specimen photos of pegmatite

为 TESCAN MIRA 3 扫描电镜, 同时搭载 9 个探测器, 包括 4 个 EDAX(Element 30)高通量硅漂移探测器(探测面积 30 mm^2 ; 600 kcps); 镜筒内 BSE 和 SE 探测器; 超快速 YAG 闪烁体 BSE 探测器; 二次电子 Everhart-Thornley 型探测器和可伸缩阴极荧光探测器(350~850 nm)。在自动化矿物分析前, 将这些样品薄片在真空中先进行碳涂层处理。本次采用高分辨扫描模式, 其 BSE 成像和能谱系统可以分析小至 0.2 μm 的矿物成分, 适用于处理结构复杂、组成多样的地质样品, 也可用于矿物颗粒较小, 需要高精度鉴定的样品。因此该模式下检测结果精确度高。

3.1 岩石学和样品描述

白云母花岗伟晶岩 DB3-1 中的石榴子石(Grt-I)形态以单一, 孤立的自形粒状晶产出, 晶粒大小一般为 0.5~3 mm, 晶面存在裂隙(图 3a)。白云母电气石花岗伟晶岩 DB5-2 中的石榴子石(Grt-II)为亚四面体, 通常与电气石, 钠长石一起出现, 晶粒大小一般为 1~10 mm, 晶面存在裂隙, 部分电气石交代石榴子石(图 3a); 贫矿(锂)伟晶岩 DB-16 中的石榴子石(Grt-III)



a. 白云母花岗伟晶岩; b. 白云母电气石花岗伟晶岩; c. 贫矿(锂)伟晶岩; d. 变质砂岩; Ab. 钠长石; Q. 石英; Grt. 石榴子石; Srl. 黑电气石; Brl. 绿柱石

图3 样品微观照片

Fig. 3 Microscopic photographs of the sample

很少见(图 3c)。变质砂岩中的石榴子石(Grt-IV)结晶良好, 孤立自形, 无夹杂物, 晶粒大小一般为 0.8~3 mm, 并且不均匀分布在基体中(图 3d)。

3.2 分析结果

3.2.1 石榴子石主量元素特征

电子探针(EPMA)分析结果见表 1。SiO₂ 含量为 35.45%~35.47%, Al₂O₃ 含量为 19.96%~20.82%, FeO 含量为 17.75%~28.19%, MnO 含量为 9.94%~17.89%, MgO 含量为 0.05%~1.60%, CaO 含量为 0.12%~7.663%,

经计算得出区内伟晶岩中的石榴子为铁铝榴石-锰铝榴石固溶体系列, 主要为铁铝榴石(Alm), 其次为锰铝榴石(Sps), 此外还有少量的钙铁榴石(And)和钙铝榴石(Grs)。而变质砂岩(DB2-2, Grt-IV)中的石榴子石中钙铁榴石(And)和钙铝榴石(Grs)含量远远大于伟晶岩(图 4a)。

石榴子石(Grt I)的 SiO₂ 含量为(35.47%~37.14%), Al₂O₃(19.96%~20.37%), FeO(23.40%~28.19%), MnO(14.35%~17.28%), MgO(0.06%~0.23%), CaO(0.1%~0.2%)。端元分子式(Sps_{33.98~41.70}Alm_{55.75~64.64}, 平均 Sps_{36.45}-Alm_{61.61})。

石榴子石(Grt II)富含 MnO(15.17%~17.89%), Al₂O₃(20.02%~20.69%), SiO₂(35.55%~37.55%), FeO(22.39%~26.86%), MgO(0.05%~0.2%), CaO(0.16%~0.25%)。端元分子式为(Sps_{36.03~42.65}Alm_{54.68~62.13}, 平均 Sps_{39.36}-Alm_{58.82})。

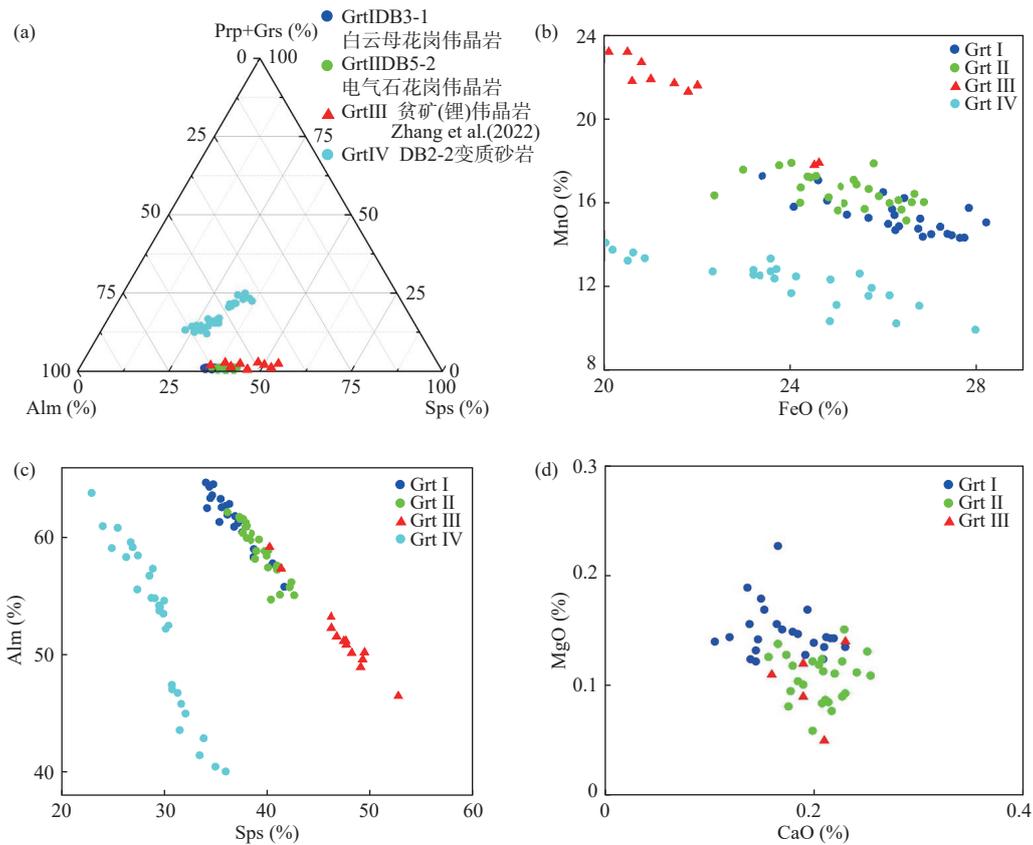
石榴子石(Grt III)含有更高浓度的 MnO(14.9%~22.5%)、更低浓度的 FeO(20.1%~8.0%)和 MgO(0.10%~0.20%), 端元分子式为(Sps_{34.56~52.71}Alm_{46.06~64.10})(Zhang, et al, 2022)。

石榴子石(Grt IV)的 SiO₂ 含量为(37.01%~38.45%), Al₂O₃ 含量为(20.26%~20.82%), FeO 含量为(17.75%~27.96%), MnO 含量为(9.4%~15.66%), MgO 含量为(0.84%~1.6%), CaO 含量为(2.39%~7.66%)。端元分子式(Sps_{22.94~35.87}Alm_{40.07~63.76}, 平均 Sps_{52.45}-Alm_{29.47})。

表 1 509 地区石榴子石矿物主量元素统计表(%)

Tab. 1 Major mineral elements (%) of garnet in the 509 area

样品	白云母花岗伟晶岩 DB3-1(Grt I)			电气石花岗伟晶岩 DB5-2(Grt II)			变质砂岩 DB-2(Grt IV)		
	SiO ₂	36.60	36.92	35.47	37.05	36.72	36.55	38.07	37.62
TiO ₂	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.07	0.05
Al ₂ O ₃	20.33	20.17	20.06	20.40	20.27	20.24	20.54	20.63	20.59
FeO	27.64	27.46	27.73	25.38	25.08	24.54	24.97	26.28	23.58
MnO	14.35	14.48	14.36	17.10	16.77	17.26	11.11	10.23	13.32
MgO	0.12	0.23	0.18	0.09	0.05	0.11	1.34	1.54	1.33
CaO	0.15	0.17	0.15	0.21	0.24	0.22	2.94	2.63	4.37
Na ₂ O	0.04	0.03	0.01	0.00	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00
MnO/(MnO+FeO)	0.34	0.35	0.34	0.40	0.40	0.41	0.31	0.28	0.36
MnO/(MnO+FeO) 平均值		0.37			0.39			0.36	
端分基石榴子石含量									
Sps	33.98	34.31	34.09	40.17	39.82	41.02	26.28	28.73	30.36
Alm	64.64	64.28	62.47	58.84	58.80	57.57	58.34	54.88	52.54
Prp	0.51	0.95	0.75	0.36	0.19	0.46	5.59	4.90	5.32
Grs	0.53	0.27	0.28	0.60	0.73	0.70	8.83	10.68	9.77



a.石榴子石三角分类图底图据 [Lovering 等\(1969\)](#); b.石榴子石 MnO-FeO 成分图解;
c.石榴子石 Alm-Sps 图解; d.石榴子石 MgO-CaO 成分图解

图4 石榴子石成分分析

Fig. 4 EMPA data analysis

本次样品电子探针显示伟晶岩中石榴子石成分(Grt-I)端元分子式($Sps_{33.98-41.70} Alm_{55.75-64.64}$, 平均 $Sps_{36.45}-Alm_{61.61}$)。(Grt-II)($Sps_{36.03-42.65} Alm_{54.68-62.13}$, 平均 $Sps_{39.36}-Alm_{58.82}$)。(Grt-III)($Sps_{34.56-52.71} Alm_{46.06-64.10}$)。伟晶岩中的端元组分(Alm-Sps)基本上呈现此消彼长的关系(图 4c), MnO 含量与 FeO 的含量呈现出负相关, 贫矿(锂)伟晶岩的 MnO 含量较高, 白云母花岗伟晶岩最低。白云母花岗伟晶岩(Grt-I)相对于白云母电气石花岗伟晶岩(Grt-II)高 MgO 含量, 低 CaO 的含量(图 4d)。

3.2.2 矿物相特征

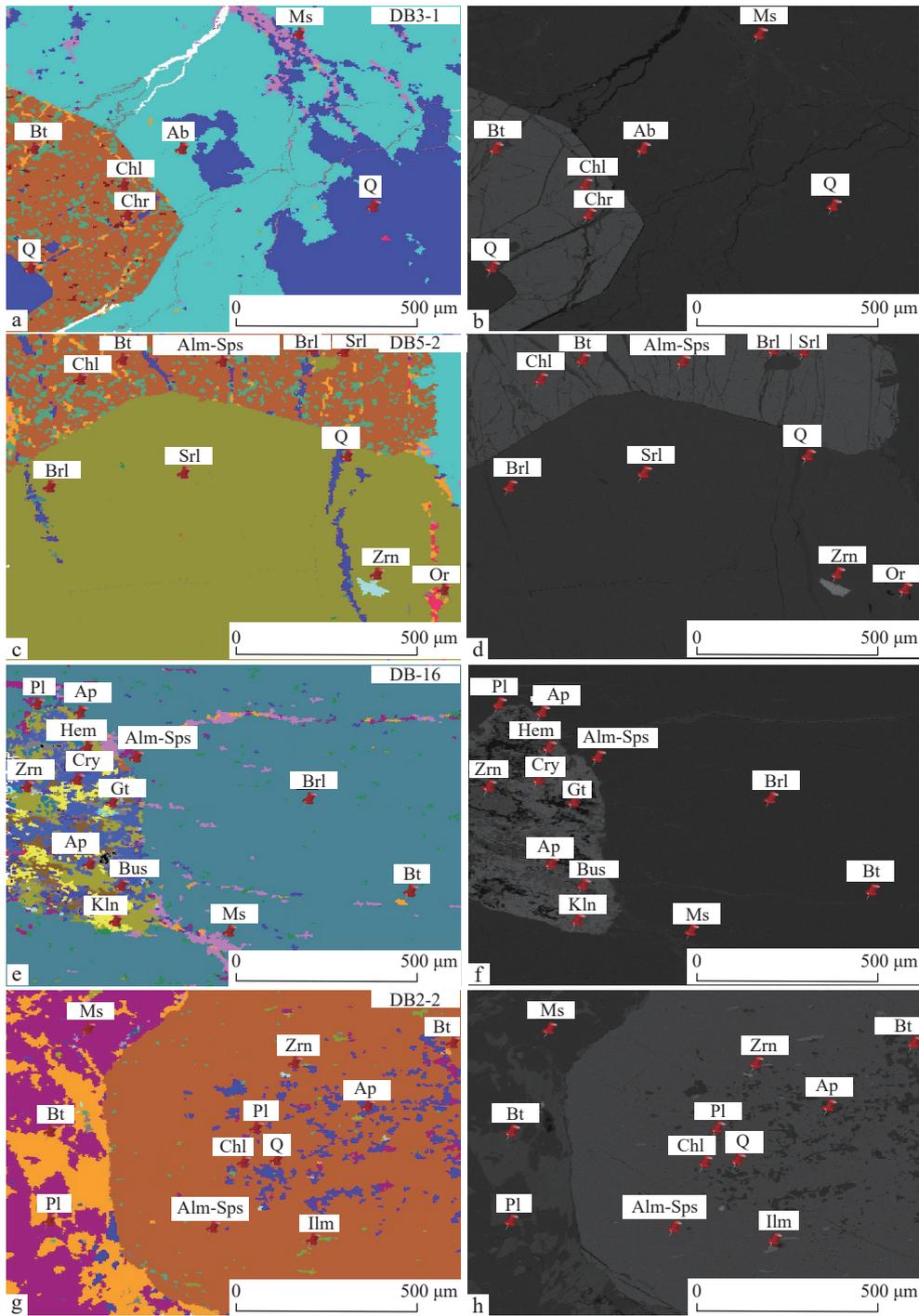
矿物定量分析(TIMA)识别出伟晶岩中矿物组合为石英、钠长石、白云母、黑云母、石榴子石等, 而变质砂岩中的矿物组合为石榴子石、斜长石、黑云母等。白云母花岗伟晶岩中的石榴子石(Grt-I)中的包裹体矿物为铬铁矿、绿泥石、黑云母等(图 5a); 白云母电气石花岗伟晶岩中的石榴子石(Grt-II)被电气石所取代, 其包裹体矿物为少量绿柱石、电气石、黑云母、绿

泥石、石英等, 电气石包裹体矿物为锆石、正长石、石英、绿柱石等(图 5c); 贫矿伟晶岩中的石榴子石(Grt-III)包裹体为磷铁锰矿、赤铁矿/磁铁矿、隐钾锰矿、磷灰石、锆石、针铁矿、高岭石、绿柱石等(图 5e); 变质砂岩中的石榴子石(GrtIV), 包裹体为锆石、磷灰石、黑云母、石英、斜长石、绿泥石、钛铁矿(图 5g)。矿区石榴子石的 BSE 图中均未有明显的无生长环带(图 5b、图 5d、图 5f、图 5h), 说明其温压条件相对稳定。

4 讨论

4.1 石榴子石成因

在花岗伟晶岩岩浆成因研究中, 确定石榴子石的成因有着重要的作用, 岩浆成因的石榴子石对于指示岩浆组分、温度、压力的有着重大意义([吕正航等, 2017](#); [Javanmard et al., 2018](#))。过铝质 S 型岩浆结晶形成的石榴子石以低钙高锰为特征([Harangi et al.,](#)



a.白云母花岗岩伟晶岩(Grt I); c.白云母电气石花岗岩伟晶岩(Grt II); e.贫矿(锂)伟晶岩(Grt III); f.变质砂岩(Grt IV)矿相图; b(Grt I), d(Grt II), f(Grt III), h(Grt III)BSE 图, Ab.钠长石; Ap.磷灰石; Alm-Sps.铁铝榴石-锰铝榴石; Brl.绿柱石; Bt.黑云母; Bus.磷铁锰矿; Chl.绿泥石; Cry.隐钾锰矿; Hem.赤铁矿; Chr.铬铁矿; Ms.白云母; Ilm.钛铁矿; Kln.高岭石; Gt.针铁矿; Or.正长石; Pl.斜长石; Q.石英; Srl.黑电气石; Zrn.锆石

图5 矿区矿物相图与对应的 BSE 图

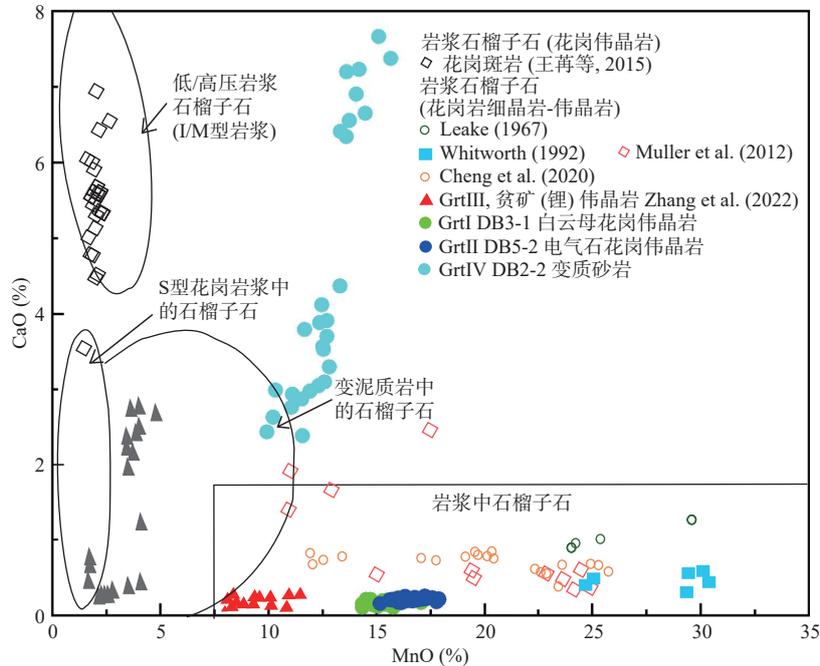
Fig. 5 Mineral facies diagram of the mining area and the corresponding BSE diagram

2001)。矿区内的花岗伟晶岩中的石榴子石具有贫 Ca 富 Mn 的特征(Manning, 1983), 花岗伟晶岩中的石榴子石投图落点在高分异伟晶岩-细晶岩当中, 含矿

伟晶岩比不含矿伟晶岩结晶分异程度要高(图 6), 暗示石榴子石结晶形成于 S 型岩浆, 区内伟晶岩是花岗岩高度演化产物的观点符合(唐俊林等, 2022)。变质

砂岩中石榴子石, MnO 含量为 12.65%~15.66%, CaO 含量为 2.39%~7.66%, (图 4b、图 4c)。据前人研究表明变质泥岩中的石榴子石中的 CaO<4% 和 MnO<12%

(Samadi et al., 2014, 陈欢等, 2020), 虽然 MnO、CaO 含量要微大于常规变质成因石榴子石的含量, 但其成因应该为变质成因, 可能是后期经历了热液改造。



数据源自 Leake(1967)、Whitworth(1992)、Muller等(2012)、Samadi(2014)、王冉等(2015)、陈欢等(2020)、Zhang等(2022)

图6 石榴子石 CaO-MnO 组分图解

Fig. 6 Diagram of CaO-MnO components

花岗伟晶岩中的石榴子石地球化学特征为 MnO>12%, CaO<2%(Samadi et al., 2014, 陈欢等, 2020), 区内中伟晶岩中的石榴子石为铁铝榴石-锰铝榴石固溶体序列, 具有富 Mn、低 Ca、贫 Mg 的特点 (MnO 为 14.3%~17.9%, CaO<0.3%, MgO<0.23%)。石榴子石端元组分中的锰铝榴石(Sps)含量为 34.0%~42.65%, 钙铝榴石-镁铝榴石为 0.45%~1.42%, 不符合变质成因高 Ca、Mg, 低 Mn 的成分特征, 故 509 道班西矿床伟晶岩为岩浆成因 (Samadi et al., 2014, 陈欢等, 2020)。笔者对世界各地不同成因的石榴子石成分进行对比分析, 发现矿区内伟晶岩石榴子石成分为伟晶岩-细晶岩范围属于岩浆成因。

4.2 石榴子石对岩浆演化的启示

目前主流观点认为, 花岗伟晶岩稀有金属矿床中成矿流体是岩浆高度分异结晶的结果, 长石、电气石等矿物的析出使得岩浆化学组分发生变化, 石榴子石中的化学组分会随着岩浆演化而发生变化 (Cerný, 1985; 郑范博等, 2021)。伟晶岩中的石榴子石被认为是具有晶体快速生长、低成核密度、晶体内部离子缓慢扩散的特点 (Manning, 1983; Whitworth, 1992; 陈欢

等, 2020)。岩浆结晶分异早期的石榴子石常以富 Fe 的铁铝榴石-锰铝榴石或者富铁铝榴石形式出现, 晚期的石榴子石一般是富 Mn 的铁铝榴石-锰铝榴石固溶体序列或者富锰铝榴石出现 (Muller et al., 2012)。矿区中石榴子石 (Grt I) 的 FeO 含量为 23.4%~28.2%, Grt II 的 FeO 含量为 22.4%~26.9%, 贫(锂)矿伟晶岩 (Grt III) 的 FeO 含量为 20.1%~8.0% (图 4b) (Cerný, 1985; Muller et al., 2012; 陈欢等, 2020), MnO/(MnO + FeO) 值随着岩浆演化的伟晶岩的分馏程度不断提高而不断提高, Grt I (0.37)、Grt II (0.39) 和 Grt III (0.46) 逐渐增加, 故伟晶岩演化顺序为白云母伟晶岩-电气石伟晶岩-贫矿(锂)伟晶岩, 随着岩浆分异程度的提高, 石榴子石中 CaO, MgO 不断降低 (图 4d)。石榴子石的铁铝榴石与锰铝榴石呈现出负相关, 锰铝榴石随着岩浆分异程度的提高而不断提高 (图 4c)。

岩浆组分、温度、压力以及矿物之间进行的元素竞争共同影响着石榴子石组分 (Green, 1977; London, 2008; Yang et al., 2013; 陈欢等, 2020; 姜鹏飞等, 2023)。石榴子石 Mn 含量主要受到镁铁质矿物 (Mg、Fe 的相容性大于 Mn) 的控制, 如黑云母, 电气石等。在电气

石与石榴子石共存的岩浆环境当中,电气石消耗了大量岩浆熔体中的Mg、Fe组分,使得残余岩浆熔体贫Fe富Mn,也是造成石榴子石核部富Fe边部富Mn现象的主要原因。岩浆成因石榴子石中成分的分带性对

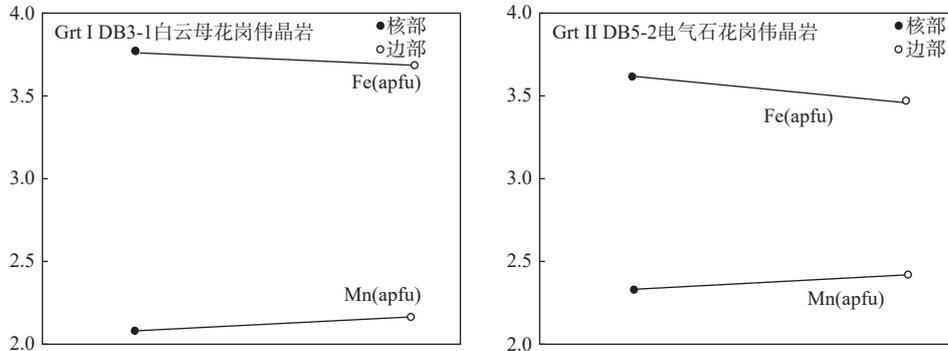


图7 伟晶岩中石榴子石核边Fe-Mn元素含量变化特征

Fig. 7 Variation characteristics of Fe-Mn element content in garnet in pegmatites

4.3 石榴子石对稀有金属成矿的指示

伟晶岩中富Mn的石榴子石常作为晚期高分异矿化伟晶岩的指标,锂矿化系数与石榴子石是锰铝榴石组分呈现出正相关(Cerný et al., 1985; Selway et al., 2005; 吕正航等, 2017; 姜鹏飞等, 2023)。矿区中贫矿(锂)伟晶岩中的石榴子石Mn和锰铝榴石含量相对于其他伟晶岩来说含量较高,对比其他矿化伟晶岩地区如括阿尔泰柯鲁木特地区、非洲地区、爱尔兰伦斯特地区也有类似的规律,因此高Mn含量($MnO > 22.5\%$)的石榴子石可以作为该区寻找高分异矿化伟晶岩的指标,也可作为LIBIS和X荧光测试仪野外找矿的指示元素。

5 结论

(1) 矿区中伟晶岩石榴子石为岩浆成因,属于铁铝榴石-锰铝榴石固溶体系列。

(2) 石榴子石随着岩浆演化分异程度增加而逐渐富Mn。伟晶岩的演化顺序为白云母花岗伟晶岩-白云母电气石花岗伟晶岩-贫矿(锂)伟晶岩。

(3) 伟晶岩中的石榴子石Mn含量受到电气石等(Mg、Fe)矿物的影响,结晶分异程度越高其Mn含量越高,故高Mn含量($MnO > 22.5\%$)的石榴子石可作为晚期高分异矿化伟晶岩的标志。

参考文献(References):

陈欢,冯梦,康志强,等. 桂东北茅安塘伟晶岩中石榴子石的特

于温度要求苛刻,当温度大于700℃时才会出现石榴子石核部富Fe,边部富Mn。509道班西矿床中的石榴子石核部Fe富集边部Mn富集(图7),推断矿区中石榴子石形成于高于700℃的花岗伟晶岩岩浆分异。

征及对岩浆演化的指示意义[J]. 地球科学, 2020, 45(6): 2059-2076.

CHEN Huan, FENG Meng, KANG Zhiqiang, et al. Characteristics of Garnets in Pegmatites of Mao'antang, Northeast Guangxi, and Their Implications for Magmatic Evolution[J]. Earth Science, 2020, 45(6): 2059-2076.

董连慧,冯京,刘德权,等. 新疆成矿单元划分方案研究[J]. 新疆地质, 2010, 28(1): 1-15.

DONG Lianhui, FEN Jing, LIU Dequan, et al. Research for Classification Metallogenic Unit of Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2010, 28(1): 1-15.

凤永刚,王艺茜,张泽,等. 新疆大红柳滩伟晶岩型锂矿床中磷铁锂矿地球化学特征及其对伟晶岩演化的指示意义[J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1405-1421.

FENG Yonggang, WANG Yiqian, ZHANG Ze, et al. Geochemistry of triphylite in Dahongliutan lithium pegmatites, Xinjiang: implications for pegmatite evolution[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(6): 1405-1421.

何蕾,高景刚,王登红,等. 新疆大红柳滩稀有金属矿田花岗岩与伟晶岩成因关系探讨[J]. 矿床地质, 2023, 42(4): 693-712.

HE Lei, GAO Jinggang, WANG Denghong, et al. Discussion on genetic relationship between granite and pegmatite in Dahongliutan rare metal ore field, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2023, 42(4): 693-712.

高一航,陈川,马华东,等. 新疆西昆仑大红柳滩矿集区含锂伟晶岩脉识别与找矿预测[J]. 矿床地质, 2023, 42(1): 41-54.

GAO Yihang, CHEN Chuan, MA Huadong, et al. Identification and prediction of lithium bearing pegmatite dikes in Dahongliutan ore concentration area in West Kunlun, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2023, 42(1): 41-54.

计文化,周辉,李荣社,等. 西昆仑新藏公路北段古-中生代多期次构造-热事件年龄确定[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2007, 32(5): 671-680.

JI Wenhua, ZHOU Hui, LI Rongshe, et al. The Deformation Age of

- Palaeozoic-Mesozoic Tectonic along North Xin-Zang Road in West Kunlun[J]. *Earth Science*, 2007, 32(5): 671-680.
- 姜鹏飞, 李鹏, 李建康, 等. 幕阜山地区花岗岩-伟晶岩系统中石榴石的组成特征及其对岩浆演化和稀有金属矿化的指示[J]. *岩石学报*, 2023, 39(7): 2025-2044.
- JIANG Pengfei, LI Peng, LI Jiankang, et al. Compositional characteristics of garnet in granite-pegmatite system in Mufushan area and its implications for magmatic evolution and rare metal mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(7): 2025-2044.
- 孔会磊, 任广利, 李文渊, 等. 西昆仑大红柳滩东含锂辉石花岗岩伟晶岩脉年代学和地球化学特征及其地质意义[J]. *西北地质*, 2023, 56(2): 61-79.
- KONG Huilei, REN Guangli, LI Wenyuan, et al. Geochronology, Geochemistry and Their Geological Significances of Spodumene Pegmatite Veins in the Dahongliutandong Deposit, Western Kunlun, China[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(2): 61-79.
- 李荣社, 计文化, 赵振明, 等. 昆仑早古生代造山带研究进展[J]. *地质通报*, 2007, 26(4): 373-382.
- LI Rongshe, JI Wenhua, ZHANG Zhenming, et al. Progress in the study of the Early Paleozoic Kunlun orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(4): 373-382.
- 李侃, 高永宝, 滕家欣, 等. 新疆和田县大红柳滩一带花岗岩伟晶岩型稀有金属矿成矿地质特征、成矿时代及找矿方向[J]. *西北地质*, 2019, 52(4): 206-221.
- LI Kan, GAO Yongbao, TENG Jiaxin, et al. Metallogenic Geological Characteristics, Mineralization Age and Resource Potential of the Granite-Pegmatite-Type Rare Metal Deposits in Dahongliutan Area, Hetian County, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(4): 206-221.
- 吕正航, 张辉, 赵景宇. 新疆柯鲁木特伟晶岩脉中石榴子石组成对岩浆-热液过程及Li矿化的制约[J]. *矿物学报*, 2017, 37(3): 247-257.
- LV Zhenghang, ZHANG Hui, ZHAO Jingyu. Magmatic-Hydrothermal Evolution and Li Mineralization in Pegmatite: Constraints from Composition of Garnet from Kelumute No. 112 Pegmatite, Xinjiang Autonomous Region, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2017, 37(3): 247-257.
- 潘裕生. 西昆仑山构造特征与演化[J]. *地质科学*, 1990(3): 224-232.
- PAN Yusheng. Tectonic Features and Evolution of the Western Kunlun Mountain Region[J]. *Chinese Journal of Geology*, 1990(3): 224-232.
- 潘桂棠, 王立全, 李兴振, 等. 青藏高原区域构造格局及其多岛弧盆系的空间配置[J]. *沉积与特提斯地质*, 2001, 21(3): 1-26.
- PAN Guizhi, WANG Liqun, LI Xingzhen, et al. The tectonic framework and spatial allocation of the archipelagic arc basin systems on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2001, 21(3): 1-26.
- 彭海练, 贺宁强, 王满仓, 等. 新疆和田县大红柳滩地区509道班西稀有金属矿地质特征与成矿规律探讨[J]. *西北地质*, 2018, 51(3): 146-154.
- PENG Hailian, HE Ningqiang, WANG Mancang, et al. Geological Characteristics and Metallogenic regularity of West Track 509 Rare Polymetallic Deposit in Dahongliutan Region, Hetian, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2018, 51(3): 146-154.
- 乔耿彪, 张汉德, 伍跃中, 等. 西昆仑大红柳滩岩体地质和地球化学特征及对岩石成因的制约[J]. *地质学报*, 2015, 89(7): 1180-1194.
- QIAO Gengbiao, ZHANG Hande, WU Yuezhong, et al. Petrogenesis of the Dahongliutan Monzogranite in Western Kunlun: Constraints from SHRIMP Zircon U-Pb Geochronology and Geochemical Characteristics[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(7): 1180-1194.
- 任广利, 孔会磊, 赵凯东, 等. 新疆喀喇昆仑大红柳滩一带锂矿光谱特征及其找矿指示意义[J]. *西北地质*, 2022, 55(4): 103-114.
- REN Guangli, KONG Huilei, ZHAO Kaidong, et al. Spectral Characteristics and Prospecting Implications of Lithium Deposits in Dahongliutan Area, Karakoram, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(4): 103-114.
- 谭克彬, 郭岐明, 郭勇明. 新疆和田509道班西锂铍多金属矿床花岗岩U-Pb年龄及其构造意义[J]. *新疆有色金属*, 2021, 44(2): 6-10.
- TAN Kebin, GUO Qiming, GUO Yongming. U-Pb age and tectonic significance of granite in 509 Daobanxi lithium-plated polymetallic deposit in Hotan, Xinjiang[J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 2021, 44(2): 6-10.
- 涂其军, 韩琼, 李平, 等. 西昆仑大红柳滩一带锂辉石矿基本特征和勘查新进展[J]. *地质学报*, 2019, 93(11): 2862-2873.
- TU Qijun, HAN Qiong, LI Ping, et al. Basic characteristics and exploration progress of the spodumene ore deposit in the Dahongliutan area, West Kunlun[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(11): 2862-2873.
- 唐俊林, 柯强, 徐兴旺, 等. 西昆仑大红柳滩地区龙门山锂铍伟晶岩区岩浆演化与成矿作用[J]. *岩石学报*, 2022, 38(3): 655-675.
- TANG Junlin, KE Qiang, XU Xingwang, et al. Magma evolution and mineralization of Longmenshan lithium-beryllium pegmatite in Dahongliutan area, West Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(3): 655-675.
- 王核, 高昊, 马华东, 等. 新疆和田县雪风岭锂矿床、雪盆锂矿床和双牙锂矿床地质特征及伟晶岩脉群分带初步研究[J]. *大地构造与成矿学*, 2020, 44(1): 57-68.
- WANG He, GAO Hao, MA Huadong, et al. Geological Characteristics and Pegmatite Vein Group Zoning of the Xuefengling, Xuepen, and Shuangya Lithium Deposits in Karakorum, Hetian, Xinjiang[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2020, 44(1): 57-68.
- 王核, 徐义刚, 闫庆贺, 等. 新疆白龙山伟晶岩型锂矿床研究进展[J]. *地质学报*, 2021, 95(10): 3085-3098.
- WANG He, XU Yigang, YAN Qinghe, et al. Research progress on Bailongshan pegmatite type lithium deposit, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(10): 3085-3098.
- 王威, 杜晓飞, 刘伟, 等. 西昆仑509道班西锂铍稀有金属矿地质特征与成矿时代探讨[J]. *岩石学报*, 2022, 38(7): 1967-1980.
- WANG Wei, DU Xiaofei, LIU Wei, et al. Geological characteristic and discussion on metallogenic age of the West 509-Daoban Li-Be rare metal deposit in the West Kunlun Orogenic Belt[J].

- Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(7): 1967–1980.
- 王冉, 张胜龙. 西准噶尔玉依塔勒盆克提斑岩体中石榴子石的发现及地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(6): 1254–1261.
- WANG Ran, ZHANG Shenglong. The Discovery of Garnet from Yuyitalepenketi Granite Porphyry in Western Junggar and its Geological Significances[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(6): 1254–1261.
- 王登红, 李建康, 付小方. 四川甲基卡伟晶岩型稀有金属矿床的成矿时代及其意义[J]. 地球化学, 2005, 34(6): 541–547.
- WANG Denghong, LI Jiankang, FU Xiaofang. The Ore - forming Epoch and Its Significance of the Jiajika Pegmatite - type Rare Metal Deposit in Sichuan Province[J]. Geochimica, 2005, 34(6): 541–547.
- 肖文交, 侯泉林, 李继亮, 等. 西昆仑大地构造相解剖及其多岛增生过程[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2000, 24(S1): 22–28.
- XIAO Jiaowei, HOU Quanli, LI Jiliang, et al. Tectonic Facies Dissection of the West Kunlun and Its Multi - Island Accretion Process[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2000, 24(S1): 22–28.
- 周兵, 孙义选, 孔德懿. 新疆大红柳滩地区稀有金属矿成矿地质特征及找矿前景[J]. 四川地质学报, 2011, 31(3): 288–292.
- ZHOU Bing, SUN Yixuan, KONG Deyi. Geological Features and Prospecting Potential of Rare Metallic Deposits in the Dahongliutan Region, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sichuan, 2011, 31(3): 288–292.
- 魏小鹏, 王核, 胡军, 等. 西昆仑大红柳滩二云母花岗岩地球化学和地质年代学研究及其地质意义[J]. 地球化学, 2017, 46(1): 66–80.
- WEI Xiaopeng, WANG He, HU Jun, et al. Geochemistry and geochronology of the Dahongliutan two-mica granite pluton in western Kunlun orogen: Geotectonic implications[J]. Geochimica, 2017, 46(1): 66–80.
- 郑范博, 王国光, 倪培. 花岗伟晶岩型稀有金属矿床流体成矿机制研究进展[J]. 地质力学学报, 2021, 27(4): 596–613.
- ZHENG Fanbo, WANG Guoguang, NI Pei. Research progress on the fluid metallogenic mechanism of granitic pegmatite-type rare metal deposits[J]. Journal of Geomechanics, 2021, 27(4): 596–613.
- Cerný P, Meintzer R E, Anderson A J. Extreme fractionation in rare-element granitic pegmatites—selected examples of data and mechanisms[J]. Canadian Mineralogist, 1985, 23: 381–421.
- Fan I J, Tang G J, Wei G J, et al. Lithium isotope fractionation during fluid exsolution: Implications for Li mineralization of the Bailongshan pegmatites in the West Kunlun, NW Tibet[J]. Lithos, 2020(352-353): 1–17.
- Gaspar M, Knaack C, Meinert L D. REE in skarn systems: A LA-ICP-MS study of garnets from the Crown Jewel gold deposit[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(1): 185–205.
- Geiger C A. Garnet: A key phase in nature, the laboratory, and technology[J]. Elements, 2013, 9(6): 447–452.
- Green T H. Garnet in silicic liquids and its possible use as a P-T indicator[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1977, 65(1): 59–67.
- Harrison T N. Magmatic garnets in the Cairngorm granite, Scotland [J]. Mineralogical Magazine, 1988, 52(368): 659–667.
- Harangi S, Downes H, Kosa L. Almandine Garnet in Calc-alkaline Volcanic Rocks of the Northern Pannonian Basin (Eastern-Central Europe): Geochemistry, Petrogenesis and Geodynamic Implications[J]. Journal of Petrology, 2001, 42(10): 1813–1843.
- Muller A, Kearsley A, Spratt J. Petrogenetic implications of magmatic garnet in granitic pegmatites from Southern Norway[J]. The Canadian Mineralogist, 2012, 50(4): 1095–1115.
- Javanmard S R, Tahmasbi Z, Ding X, et al. Geochemistry of garnet in pegmatites from the Boroujerd intrusive complex, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran: Implications for the origin of pegmatite melts[J]. Mineralogy and Petrology, 2018, 112(6): 837–856.
- London D. Pegmatites. Mineralogical Association of Canada[M]. Special Publications, 2008, 10: 1–347.
- Lovering J F, White A J R. Granulitic and Eclogitic Inclusions from Basic Pipes at Delegate, Australia[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1969, 21(1): 9–52.
- Leake B E. Zoned Garnets from the Galway Granite and Its Aplites[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1967, 3: 311–316.
- Morgan G B V I and London D. Crystallization of the Little Three layered pegmatite-aplite dike, Ramona District, California[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1999, 136(4): 310–330.
- Manning D A C. Chemical variation in garnets from aplites and pegmatites, peninsular Thailand[J]. Mineralogical Magazine, 1983, 47: 353–358.
- Miller C F and Stoddard E F. The role of manganese in the paragenesis of magmatic garnet: An example from the Old Woman-Piute Range, California[J]. The Journal of Geology, 1981, 89(2): 233–246.
- Cuney M, Barbey P. Uranium, rare metals, and granulite facies metamorphism[J]. Geoscience Frontiers, 2014, 5(5): 729–745.
- Raimbault L, Cuney M, Azencott C, et al. Geochemical evidence for a multistage magmatic genesis of Ta-Sn-Li mineralization in the granite at Beauvoir, French Massif Central[J]. Economic Geology, 1995, 90(3): 548–576.
- Selway J B, Breaks F W, Tindle A G. A review of rare-element (Li-Cs-Ta) pegmatite exploration techniques for the Superior Province, Canada, and large worldwide tantalum deposits[J]. Exploration and Mining Geology, 2005, 14(1–4): 1–30.
- Samadi R, Miller N R, Mirnejad H, et al. Origin of garnet in aplite and pegmatite from Khajeh Morad in northeastern Iran: A major, trace element and oxygen isotope approach[J]. Lithos, 2014, 208–209: 378–392.
- Whitworth M P. Petrogenetic implications of garnets associated with lithium pegmatites from SE Ireland[J]. Mineralogical Magazine, 1992, 56: 75–83.
- Yang J H, Peng J T, Hu R Z, et al. Garnet geochemistry of tungsten-mineralized Xihuashan granites in South China[J]. Lithos, 2013, 177: 79–90.
- Zhang X Y, Wang H, Yan Q H. Garnet geochemical compositions of the Bailongshan lithium polymetallic deposit in Xinjiang Province: Implications for magmatic-hydrothermal evolution[J]. Ore Geology Reviews, 2022, 150–178.