

明添学,唐忠,李蓉,等.滇西那俄花岗伟晶岩型铍矿床矿石矿物的元素组成特征及其成矿意义.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(2):479-497,doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230126.

Ming Tianxue, Tang Zhong, Li Rong, et al. Elemental Composition and Metallogenic Significance of Ore Minerals in Na' e Granite-Pegmatite Type Beryllium Deposit in Western Yunnan Province. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(2): 479-497, doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20230126.

滇西那俄花岗伟晶岩型铍矿床矿石矿物的元素组成特征及其成矿意义

明添学^{1,2,3}, 唐忠^{1,2,4}, 李蓉^{1,2,3}, 何小虎^{2,5}, 田素梅¹, 殷伟¹,
覃勇凯⁶, 包丛法⁷, 李良⁵, 杨斯琦⁸, 张子军⁶

1. 云南省地质调查院(云南省地质科学研究所), 昆明 650051

2. 自然资源部三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 昆明 650051

3. 云南省三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 昆明 650051

4. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093

5. 云南大学地球科学学院, 昆明 650500

6. 云南省核工业二〇九地质大队, 昆明 650032

7. 云南省国土资源规划设计研究院, 昆明 650216

8. 昆明理工大学材料科学与工程学院, 昆明 650093

摘要:滇西那俄铍矿床是近年评价的小型稀有金属矿床,矿体主要为石榴子石钠长石化花岗伟晶岩脉,赋存于二长花岗岩中。矿体长100~1150 m,厚度0.43~3.70 m, $w(\text{BeO})$ 为0.007%~1.790%, $w(\text{Ta}_2\text{O}_5)$ 为0.0032%~0.0533%, $w(\text{Rb}_2\text{O})$ 为0.041%~0.317%。有用组分以铍矿为主,共伴生钽、铷矿;少数矿石以钽矿为主,共伴生铍、铷矿。矿石矿物以绿柱石、钽钼铁矿、白云母、钾长石为主,区内最明显的找矿标志是含绿柱石伟晶岩,其次是含石榴子石钠长石化伟晶岩。电子探针分析显示:绿柱石属于无碱绿柱石-低碱绿柱石,分子式为 $\text{Be}_{2.8928-2.9481}\text{Al}_{1.9766-2.0225}\text{Si}_6\text{O}_{18}$;云母中 $w(\text{Li}_2\text{O})$ 为0.5001%~2.4279%, $w(\text{Rb}_2\text{O})$ 为0.7303%~2.3042%,属白云母-多硅白云母-富锂多硅白云母;钾长石中含有较高的 $w(\text{Rb}_2\text{O})$,为0.4861%~1.0334%,分子式为 $\text{K}_{0.8932-0.9713}[\text{Al}_{1.0013-1.0151}\text{Si}_{2.9809-2.9990}\text{O}_8]$;石榴子石能谱谱系以发育Mn、Fe双峰为特征,以锰铝榴石(Spe)和铁铝榴石(Alm)为主,锰铝榴石体积分数达67.02%~69.07%,属岩浆成因锰铝榴石。本区Be元素主要赋存于绿柱石中,Rb元素赋存于钾长石和白云母中,Li元素赋存于白云母-多硅白云母-富锂多硅白云母中。白云母和绿柱石成分显示那俄地区花岗质岩浆初始Li并不富集,在伟晶岩演化晚期岩浆中高度富集F-Li流体活动是该地区稀有金属异常富集的重要因素。

关键词:滇西那俄铍矿床;伟晶岩型铍矿床;花岗伟晶岩;绿柱石;云母;钾长石;石榴子石;稀有金属矿床

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230126

中图分类号:P597;P618.72

文献标志码:A

收稿日期:2023-05-13

作者简介:明添学(1988—),男,工程师,主要从事矿产资源勘查方面的研究,E-mail:385864465@qq.com

通信作者:唐忠(1985—),男,博士研究生,高级工程师,主要从事矿产资源勘查方面的研究,E-mail:99688182@qq.com

基金项目:中国地质调查局项目(DD20221695,DD20190379);云南省地质勘查基金项目(D202101,D202305,Y202305)

Supported by the Project of China Geological Survey (DD20221695,DD20190379) and the Foundation of Geological Exploration in Yunnan Province (D202101,D202305, Y202305)

Elemental Composition and Metallogenic Significance of Ore Minerals in Na'e Granite-Pegmatite Type Beryllium Deposit in Western Yunnan Province

Ming Tianxue^{1,2,3}, Tang Zhong^{1,2,4}, Li Rong^{1,2,3}, He Xiaohu^{2,5}, Tian Sumei¹, Yin Wei¹,
Qin Yongkai⁶, Bao Congfa⁷, Li Liang⁵, Yang Siqi⁸, Zhang Zijun⁶

1. Institute of Yunnan Geology Survey (Institute of Yunnan Geological Sciences), Kunming 650051, China
2. Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, Ministry of Natural and Resources, Kunming 650051, China
3. Yunnan Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, Kunming 650051, China
4. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China
5. College of Earth Science, Yunnan University, Kunming 650500, China
6. Team 209 of Yunnan Nuclear Industry, Kunming 650032, China
7. Yunnan Planning and Design Institute for Mineral and Land Resources, Kunming 650216, China
8. School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

Abstract: Na'e small pegmatitic beryllium deposit has recently been proved in the western Yunnan Province. The ore bodies are found in garnet and albitite granite pegmatite dikes within monzonitic granite. These ore bodies range from 100 - 1 150 m in length, 0.43 - 3.70 m in thickness, and contain BeO, Ta₂O₅, Rb₂O in concentrations of 0.007%-1.790%, 0.003 2%-0.053 3% and 0.041%-0.317%, respectively. The mainly major useful element in the ore is beryllium, associated with tantalum and rubidium. Some few ore mainly contains tantalum, and associated with beryllium and rubidium. The ore minerals include beryl, niobium tantalite, muscovite and K-feldspar. The beryl-bearing pegmatite is a significant prospecting indicator in the area, followed by garnet bearing albionite pegmatite. EPMA results show that beryl falls into the alkali-free beryl to low alkali beryl. The molecular formula for beryl is Be_{2.8928-2.9481} Al_{1.9766-2.0225} Si₆ O₁₈. Muscovite contains ω (Li₂ O) 0.500 1%-2.427 9% and ω (Rb₂ O) 0.730 3%-2.304 2%, belonging to muscovite-polysilica muscovite-Li-rich muscovite. K-feldspar has a high ω (Rb₂ O) content of 0.486 1%-1.033 4%, with a molecular formula of K_{0.8932-0.9713} [Al_{1.0013-1.0151} Si_{2.9809-2.9990} O₈]. Energy spectrum of garnet is characterized by the development of Mn and Fe bipeaks, mainly spessartine (Spe) and almandine (Alm), with spessartine accounting for 67.02%-69.07%, indicating a magmatic origin of spessartine. Beryllium is mainly occurred in beryl, rubidium in K-feldspar and muscovite, and lithium in muscovite-polysilica muscovite-Li-rich muscovite. The composition of muscovite and berylite shows that lithium was not initially enriched in granitic magmas in the Na'e area, but the late pegmatite evolution involving highly enriched F-Li fluid activity in magmas played an important factor in the abnormal enrichment of rare metals in this area.

Key words: Na'e beryllium deposit in western Yunnan Province; pegmatitic beryllium deposit; granite pegmatite; beryl; mica; K-feldspar; garnet; rare metal deposit

0 引言

铍具有耐极端温度和高导热性,广泛应用于航空航天、原子能、军事等领域^[1-2]。作为一种重要的战略性关键矿产,近年来锂、铍、铌、钽与稀土金属成矿理论研究和地质找矿备受关注^[3-11]。铍矿床主要与中酸性岩浆作用有关,以花岗伟晶岩型铍矿最为

重要。滇西高黎贡山变质带—腾冲岩浆弧是云南省重要的稀有金属成矿带,主要发育花岗伟晶岩型 Li-Be-Ta-Rb 矿床、花岗岩型 Li-Rb-Cs 矿床、花岗岩型 Nb-Ta 矿床^[12-14]。滇西那俄铍矿床是近年云南省地质调查局依托云南省地质勘查基金项目勘查评价的小型稀有金属矿床。目前滇西腾冲地块花岗伟晶岩型稀有金属矿床研究与勘查工作程度总

体较低,仅对伟晶岩型稀有金属矿床(点)的成矿时代、矿床成因等方面进行了初步研究^[12-14],整个地区缺乏系统的研究工作。因此,在总结区域地质特征基础上对那俄伟晶岩型铍矿床开展矿物学研究,对总结区域伟晶岩型稀有金属成矿作用意义重大。

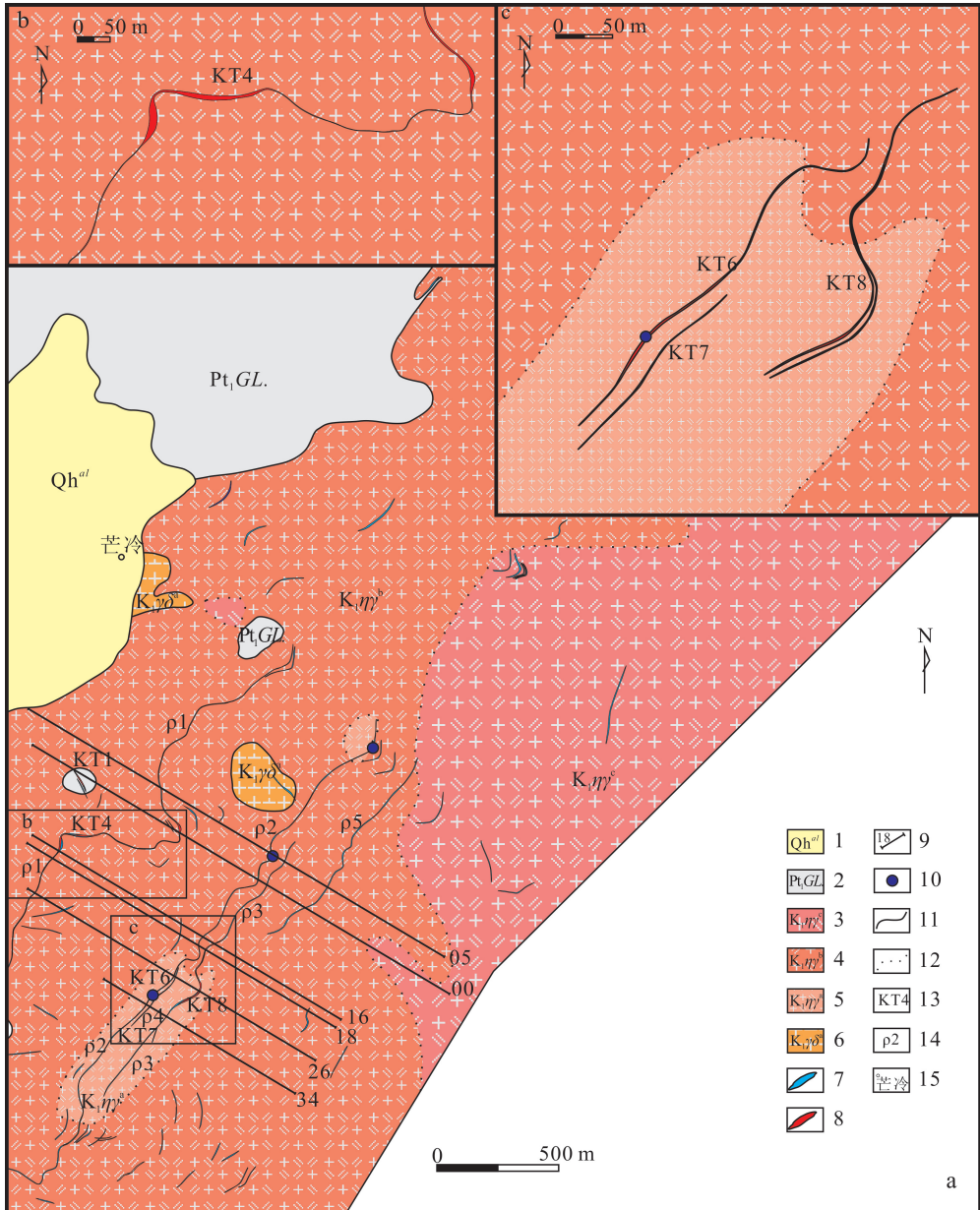
1 矿床地质特征

那俄花岗伟晶岩型铍矿床位于滨太平洋成矿域

(I₂)腾冲(造山带)成矿省(II₁)独龙江—腾冲(岩浆弧)成矿带(III₁)东河—明光(燕山期岩浆弧)Sn-Cu-Pb-Zn-Ag-Fe-Mn矿带,矿区除零星出露古元古界高黎贡山岩群(Pt₁GL)、第四系全新统冲积物(Qh^{al})外(图1),还大面积分布早白垩世二长花岗岩,局部见少量花岗闪长岩和花岗伟晶岩脉。

1.1 矿区地质

古元古界高黎贡山岩群是矿区主要出露的地



1. 第四纪冲积物;2. 高黎贡山岩群混合岩、片岩、片麻岩;3. 早白垩世中粗粒黑云二长花岗岩;4. 早白垩世中细粒黑云二长花岗岩;5. 早白垩世细粒黑云二长花岗岩;6. 早白垩世中细粒花岗闪长岩;7. 伟晶岩脉;8. 矿体;9. 勘查线及勘查线号;10. 采样点;11. 地质界线;12. 岩相界线;13. 矿体编号;14. 伟晶岩脉编号;15. 地名。

图1 滇西那俄铍矿地质矿产简图

Fig.1 Simplified geological mag of Na'e beryllium deposit in western Yunnan Province

层,其分布于矿区北部。主要岩性为片麻岩、变质中细粒长石岩屑砂岩、浅粒岩、变粒岩、石英岩等。岩性复杂,构造作用对其改造作用较大。岩层产状受构造影响较大,整体较为混乱,总体倾向为 $310^{\circ}\sim 330^{\circ}$,倾角为 $50^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。地层被黑云二长花岗岩及闪长岩多期次岩体侵位,二者呈侵入接触关系。

矿区未见大型断裂、破碎带、糜棱岩化带分布,仅于部分岩体中见小型揉皱、断层、裂隙及后期填充的石英脉、花岗伟晶岩脉分布,规模较小。矿区岩石节理发育,特别是含矿围岩——中细粒与细粒黑云二长花岗岩。主要发育倾向为 $110^{\circ}\sim 150^{\circ}$ 、 $290^{\circ}\sim 330^{\circ}$ 方向的节理,倾角以 $20^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 为主。岩石中大部分节理已被细脉及伟晶岩脉充填,特别是走向NE向,倾向为 $110^{\circ}\sim 130^{\circ}$,倾角为 $10^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 节理控制区内大部分伟晶岩脉(矿体)产出。

矿区大面积出露早白垩世二长花岗岩,局部可见少量花岗闪长岩和花岗伟晶岩脉,其中早白垩世二长花岗岩按粒径可分为细粒、中细粒、中粗粒3个岩相段。早白垩世细粒黑云二长花岗岩、片麻状黑云二长花岗岩主要分布于矿区西南部。岩石呈浅灰色、棕色,细粒花岗结构,块状构造、片麻状构造,由石英、斜长石、正长石、黑云母等矿物组成,矿物粒径较细。其中:石英粒径为 $0.5\sim 2.0$ mm,体积分数为 $30\%\sim 35\%$,他形粒状;斜长石粒径为 $0.5\sim 1.0$ mm,体积分数为 $30\%\sim 35\%$,自形一半自形板柱状;正长石粒径为 $0.5\sim 1.0$ mm,体积分数为 $30\%\sim 35\%$,自形一半自形板柱状;黑云母,灰黑色,半自形,鳞片状,体积分数为 $5\%\sim 10\%$ 。中细粒二长花岗岩是矿区主要出露的岩浆岩,亦是本区重要的含矿围岩。岩石呈浅灰色,中细粒花岗结构,块状构造、片麻状构造,由石英、斜长石、正长石、黑云母等矿物组成(图2a、b)。其中:石英粒径为 $1\sim 4$ mm,体积分数为 $30\%\sim 35\%$,他形粒状;斜长石粒径为 $2\sim 5$ mm $\times 1\sim 3$ mm,体积分数为 $30\%\sim 35\%$,自形一半自形板柱状;正长石粒径为 $2\sim 4$ mm $\times 1\sim 3$ mm,体积分数为 $30\%\sim 35\%$,自形一半自形板柱状;黑云母,灰黑色,半自形,鳞片状,体积分数为 $3\%\sim 8\%$ 。中粗粒二长花岗岩呈中一粗粒花岗结构,粒径多在 $4\sim 7$ mm之间,块状构造。岩石主要由斜长石(约 35%)、钾长石(约 32%)、石英(约 30%)及少量副矿物组成。岩石局部具高岭土化、钾化、弱绿泥石化蚀变。

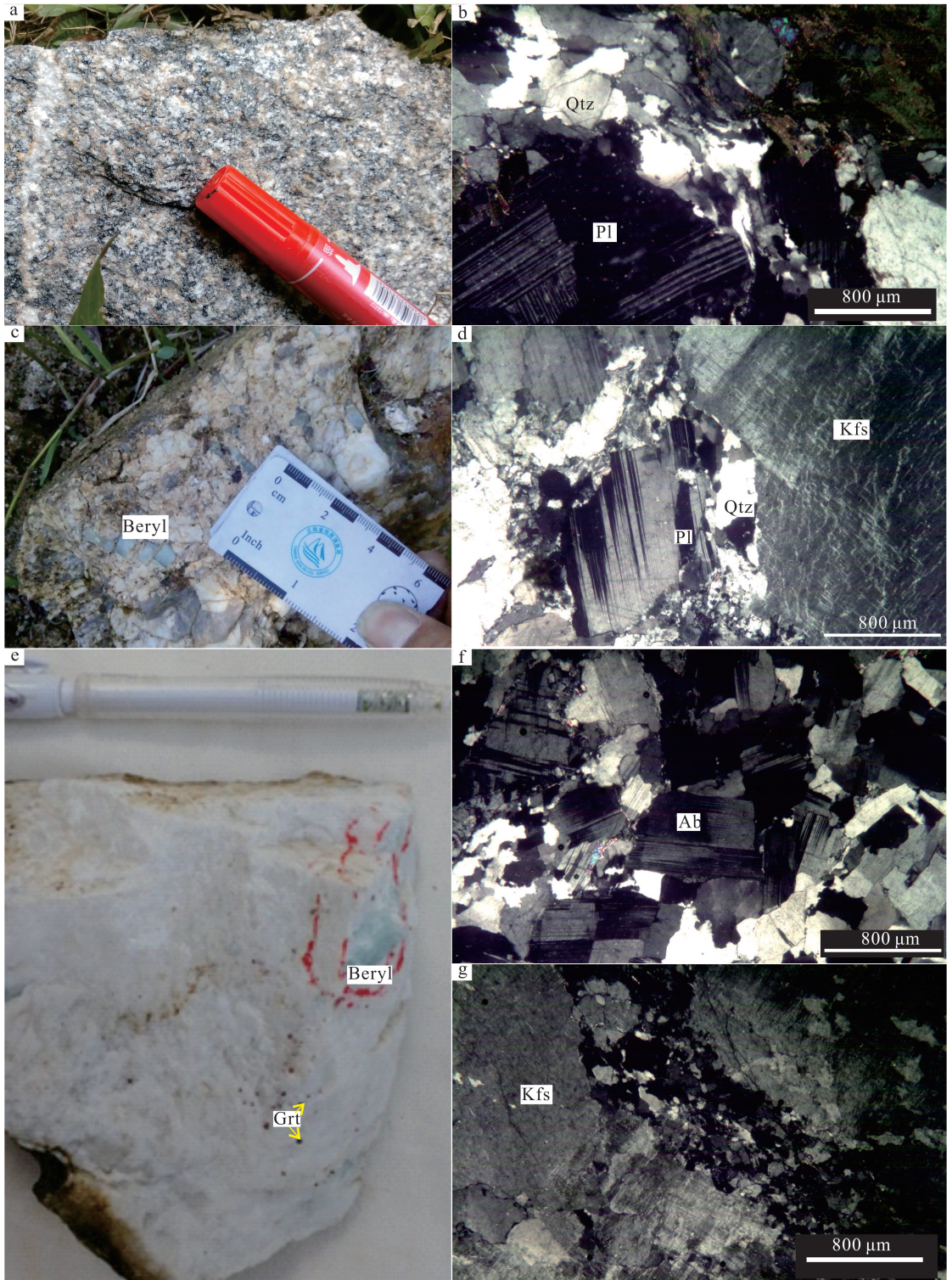
1.2 伟晶岩特征

矿区地表圈定花岗伟晶岩脉70条,厚度为 $0.1\sim 5.0$ m,含绿柱石花岗伟晶岩有18条,其中3条伟晶岩脉带走向延长 $1\sim 2$ km,倾向为 $110^{\circ}\sim 150^{\circ}$,倾角为 $10^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。含绿柱石花岗伟晶岩呈花岗伟晶结构,块状、脉状构造。岩石主要由钾长石、斜长石、石英及少量绿柱石、白云母、钠长石等组成(图2c—g)。其中自形—他形钾长石,半自形柱状斜长石,他形粒状石英混杂不均匀分布。局部可见粗大的钾长石中有规律地镶嵌粒状变晶石英,呈文象结构;绿柱石分布极不均匀(图2c、e),岩石边缘往往发育钠长石化(图2f)。岩石局部受应力作用,具有碎裂纹。

区内伟晶岩脉多数呈薄脉状,岩脉分带不明显,一般可见准文象结构伟晶岩带(图3a—d)、长英岩带(边缘带)(图3e),仅局部地段可见伟晶岩脉核心带。一般由边缘至中心可分为:1)边缘带(长英岩带)。分布于脉体两侧,多数以脉体下盘为主,与围岩接触,该带钠长石化强烈、石榴子石发育,主要由矿物粒径相对细小,以 $1\sim 3$ mm为主的长石、石英组成。厚度 $n\times 10\sim 10\times 10$ cm,且常随深度增加而变厚。此带偶见绿柱石,绿柱石柱径一般为 $0.1\sim 0.5$ cm。2)准文象结构、文象结构伟晶岩带。为主要的内部构造带,该带在伟晶岩横断面中一般占 $30\%\sim 95\%$,部分地段的伟晶岩脉几乎全为该带组成,厚度一般与脉厚成正比。一般由 $0.5\sim 5.0$ cm的长石、石英、云母组成。此带粒径自边缘至中心有明显的增大现象,见有少量的绿柱石,可见细小的绿柱石呈矿巢状分布,所见绿柱石直径一般在 $0.3\sim 1.0$ cm之间,可见少量直径 $1.0\sim 3.0$ cm绿柱石,准文象结构、文象结构伟晶岩带是主要含矿层位。3)块状体石英、长石带。不完全发育、偶见,多数构成脉体的核心,厚度为 $0.1\sim 0.3$ m。该带的形状一般与伟晶岩脉的整体形态相似,由块状的长石及石英组成,单矿物块体直径一般为 $3.0\sim 10.0$ cm,约为 80% ,局部有片状白云母集合体。

1.3 矿体特征

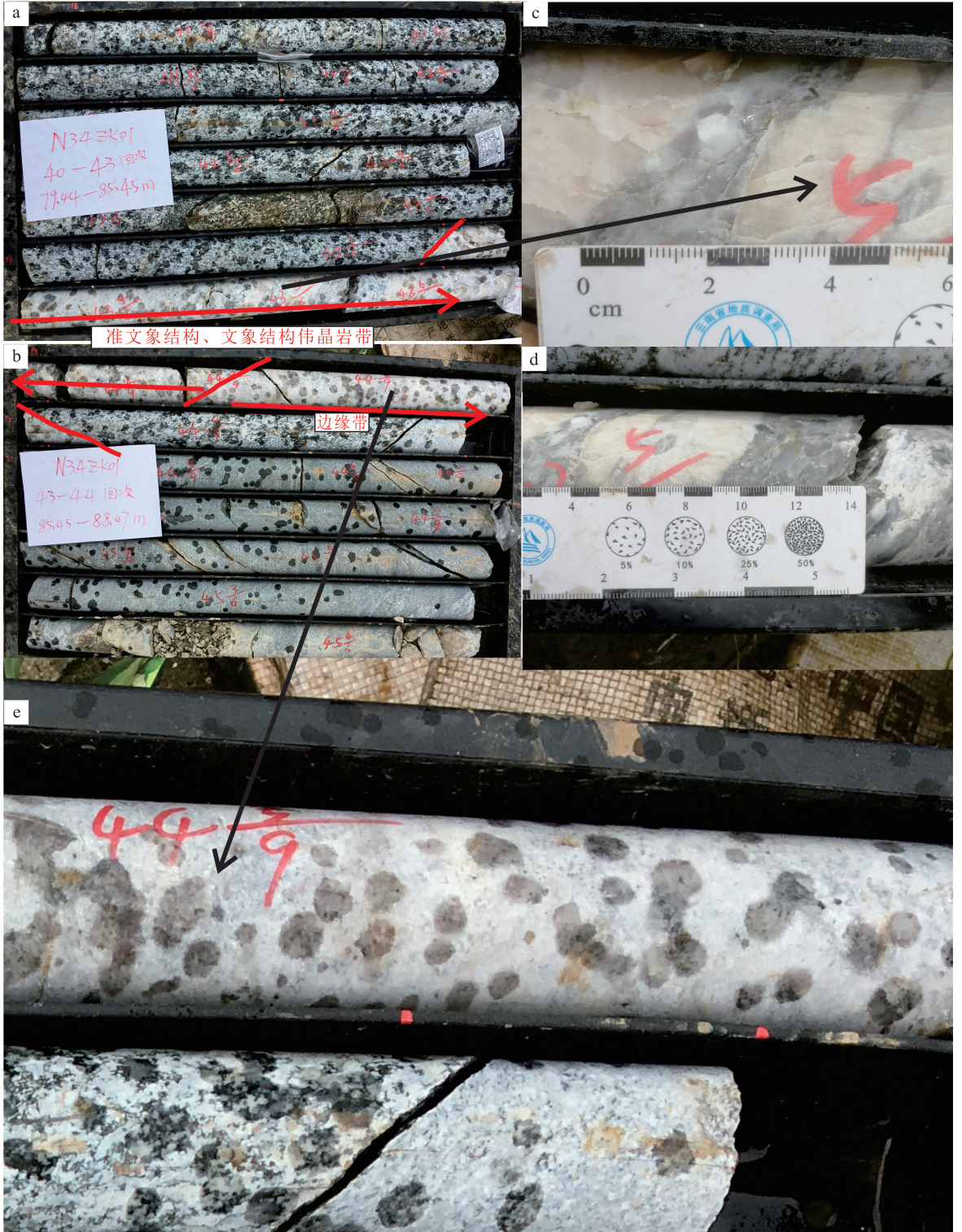
矿区共有KT1、KT2、KT2-1、KT3、KT3-1、KT4、KT4-1、KT5、KT6、KT6-1、KT6-2、KT7、KT8、KT9、KT10等15条矿体。其中:KT4、KT6为主要矿体,KT1、KT4-1、KT6-2、KT7、KT8为次要矿体,其他矿体规模较小,多数为单工程控制。



a. 伟晶岩的黑云二长花岗岩围岩;b. 黑云二长花岗岩中石英-斜长石; c. 含绿柱石花岗岩伟晶岩; d. 伟晶岩中钾长石-斜长石-石英; e. 伟晶岩中的绿柱石、石榴子石; f. 伟晶岩中的钠长石化; g. 伟晶岩中钾长石发生钠长石化、高岭土化、绢云母化。Qtz. 石英;Pl. 斜长石;Beryl. 绿柱石;Kfs. 钾长石;Grt. 石榴子石;Ab. 钠长石。下同。

图 2 那俄铍矿区含矿花岗岩和典型伟晶岩岩相学特征

Fig.2 Petrographic characteristics of mineral-bearing granite and typical pegmatite in Na' e beryllium deposit



a. 钻孔中花岗伟晶岩; b. 花岗伟晶岩分带; c. 准文象结构、文象结构带含绿柱石花岗伟晶岩; d. 准文象结构、文象结构带钾长石块体与白云母集合体; e. 边缘带长英质中细粒集合体。

图 3 研究区钻孔中花岗伟晶岩分带

Fig.3 Granite pegmatite zonation in borehole of the study area

KT4 号矿体位于 $\rho 1$ 号伟晶岩脉西南缘,矿体赋存于伟晶岩中,呈脉状、透镜状,发育铍、钽矿化。地表控制长度约 1 150 m,深部延伸 54.50~56.50 m。矿体产状 $110^{\circ}\sim 150^{\circ}\angle 10^{\circ}\sim 50^{\circ}$,倾角以 $25^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 为主。矿体厚度为 0.43~3.70 m,平均厚度为 1.46 m。品位 $w(\text{BeO})$ 为 0.007%~0.163%,平均为 0.092%; $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 为 0.008 3%~0.022 2%,平均为 0.012 8%; $w(\text{Ta}_2\text{O}_5)$ 为 0.005 1%~0.018 9%,平均为 0.010 1%; $w(\text{Rb}_2\text{O})$ 为 0.070%~0.235%,平均为 0.135%。KT6 号矿体位于 $\rho 2$ 号脉中部,呈脉状、透镜状赋存于伟晶岩脉中(图 4),含绿柱石,发育铍、钽矿化。控制长约 250 m,深部延伸 76.00~86.00 m。矿体产状 $110^{\circ}\sim 150^{\circ}\angle 20^{\circ}\sim 50^{\circ}$,倾角以 35° 左右为主。以铍矿为主,共伴生钽矿、铷矿,厚度为 0.77~1.00 m,平均为 0.87 m。品位 $w(\text{BeO})$ 为 0.040%~1.790%,平均为 0.404%; $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 为 0.008 8%~0.020 2%,平均为 0.015 2%; $w(\text{Ta}_2\text{O}_5)$ 为 0.003 2%~0.053 3%,平均 0.015 4%; $w(\text{Rb}_2\text{O})$ 为 0.078%~0.145%,平均为 0.120%。矿体主要分布于石榴子石钠长石化绿柱石花岗伟晶岩中。

1.4 矿石特征

矿石矿物主要由绿柱石、铌钽铁矿、白云母、钾长石等组成;脉石矿物主要由石英、钠长石、石榴子石、斜长石等组成。花岗伟晶岩型铍钽矿石主要呈花岗伟晶结构,矿石矿物呈中细粒、中粗粒自形柱状

结构;矿石构造主要有块状构造、脉状构造、巢状、窝状及星点状构造。

2 取样位置与分析方法

为查明矿石中稀有元素质量分数特征,本次挑选典型矿石中绿柱石、云母、钾长石、石榴子石进行电子探针研究。研究样品采集于 $\rho 2$ 号脉(图 1a,c),背散射电子(BSE)图像以及绿柱石、云母、钾长石、石榴子石的主量元素分析在南京宏创地质勘查技术服务有限公司采用电子探针 JEOL JXA-iSP100 仪器完成测试。工作条件为:加速电压 15 kV,电子束电流 20 nA,束斑直径为 10 μm (云母、钾长石)、5 μm (绿柱石)和 3 μm (石榴子石),矿物主要元素的峰位时间设定为 10 s,次要元素的峰位时间设定为 20 s,背景测定时间为峰位时间的一半,采用 ZAF 法对数据进行基体校正。所用标样如下:白铁矿(Fe)、硬石膏(S)、金属钴(Co)、金属镍(Ni)、赤铜矿(Cu)、砷化镓(As)、自然金(Au)、自然银(Ag)。能谱分析在自然资源部昆明矿产资源监督检测中心采用 EVO18 扫描电镜和 D/MAX-III A X 射线衍射仪完成。

3 分析结果

3.1 绿柱石

那俄地区绿柱石主要出现在花岗伟晶岩中,肉眼可见粒径一般为 5~30 mm,长 2~5 cm,少量可

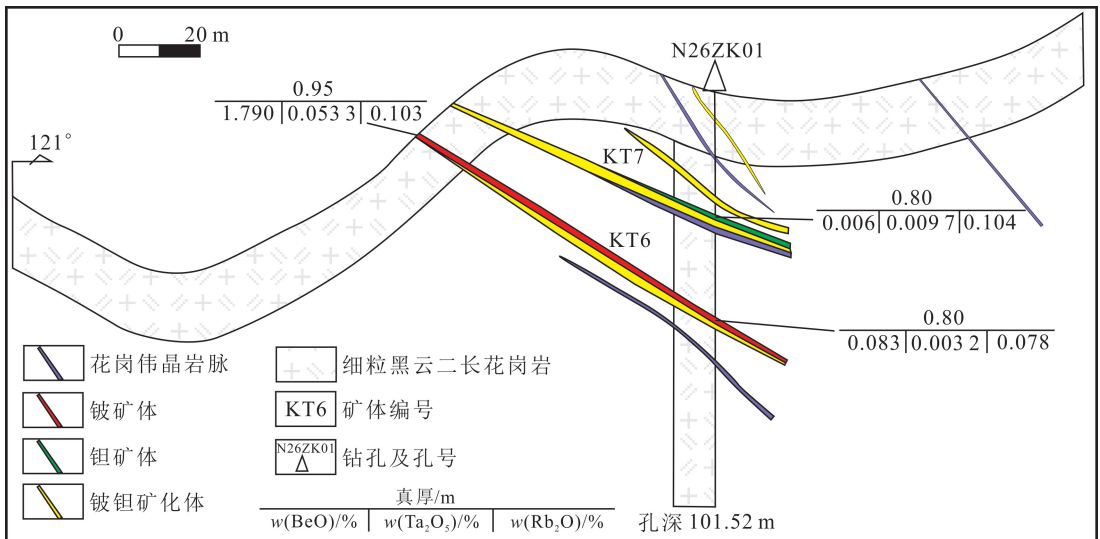


图 4 那俄铍矿 26 号勘探线剖面简图

Fig.4 Profile of No. 26 exploration line in Na'e beryllium deposit

达 10 cm。绿柱石主要以自形一半自形长柱状分布于造岩矿物间, BSE 图像显示绿柱石颗粒裂纹较发育(图 5a、b), 偶尔包裹长石、云母等矿物。因 Li、Be 属于超轻元素, 其特征 X 射线不但信号弱、能量低, 而且易受其他元素强烈吸收效应的影响, Li、Be 在电子探针(EMPA)可分析的元素范围内属于最难测准的一个元素^[15-16], 可根据原子数 $Li = Na + K + Rb + Cs$ 和 $Be = 3 - Li$ 进行换算^[17]。样品中绿柱石成分相似, 含有 BeO, $w(BeO)$ 为 12.955 0% ~ 13.208 5% (表 1), 存在于绿柱石晶体结构中的 Cs、Rb、Na、K 等碱金属质量分数在不同绿柱石中差异较小。电子探针数据显示, 那俄地区绿柱石明显富集 SiO_2

($w(SiO_2)$ 为 64.363 0% ~ 64.588 0%)、 Al_2O_3 ($w(Al_2O_3)$ 为 18.051 9% ~ 18.452 3%), 含有较低的 K_2O ($w(K_2O) < 0.02\%$) 和 Na_2O ($w(Na_2O) < 0.5\%$), 含有微量的 Cs_2O ($w(Cs_2O)$ 为 0.047 4% ~ 0.787 0%) 和极微量的 Rb_2O 。属于无碱绿柱石-低碱绿柱石类型^[18]。以 6 个 Si 原子为基准, 通过理论计算, 绿柱石的分子式为 $Be_{2.8928-2.9481} Al_{1.9766-2.0225} Si_6 O_{18}$ 。在同一矿物颗粒不同位置微量元素质量分数不一致, 绿柱石核部(Beryl-2、5、6)较边部含有种类更多、质量分数更高的微量元素。所有绿柱石样品中 $w(FeO)$ 变化不大, 主要在 0.183 5% ~ 0.726 0% 之间, 而 $w(MgO)$ 极低 ($\leq 0.0081\%$),

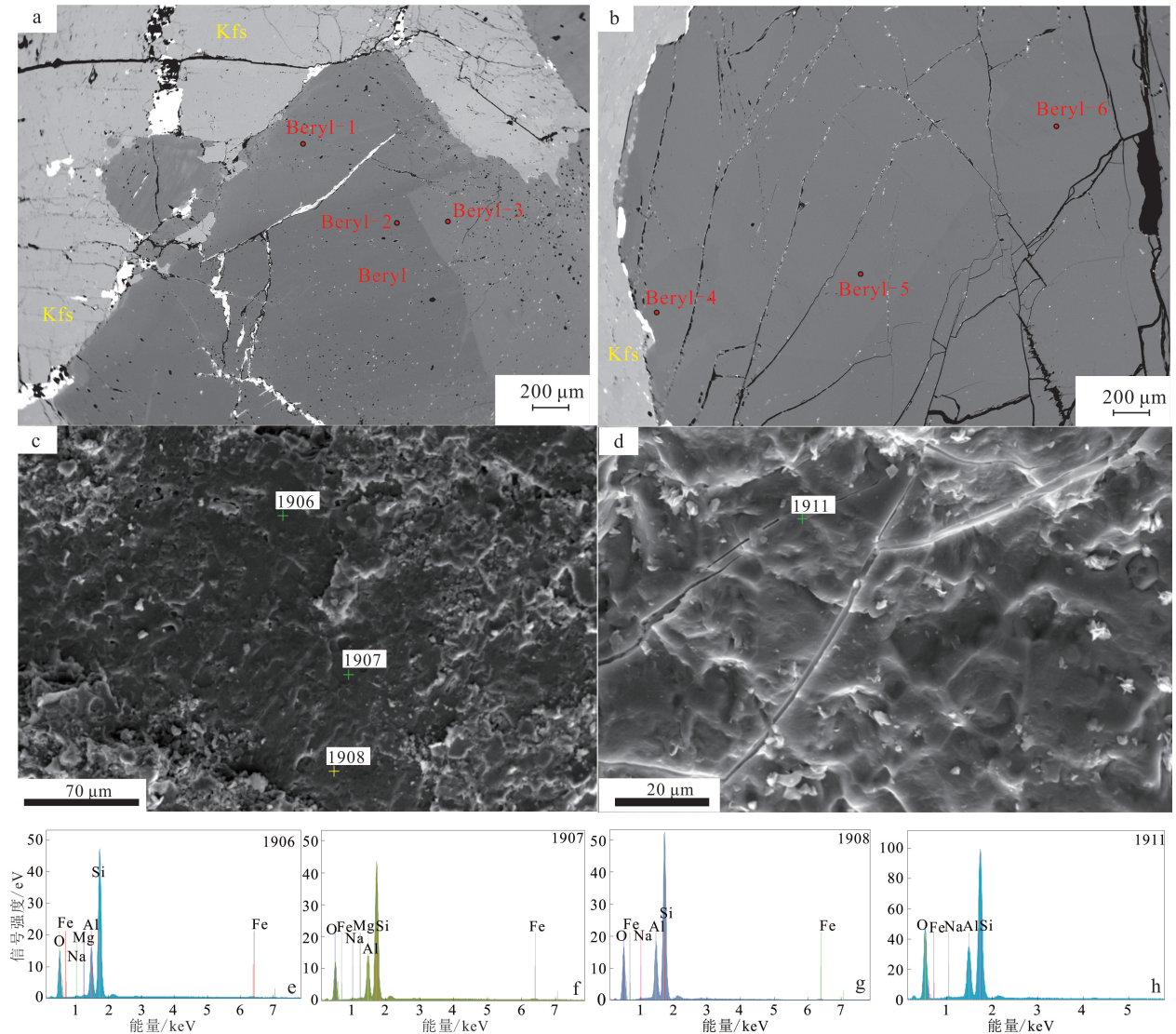


图 5 那俄花岗岩伟晶岩型铍矿床中绿柱石背散射电子图像(a、b)、二次电子图像和能谱图(c—h)

Fig.5 Image of backscattered electrons (a, b), secondary electron image and energy spectrum (c—h) of beryl in Na'e granite pegmatitic beryllium deposit

表 1 那俄花岗伟晶岩型铍矿床矿石中绿柱石的主量和微量元素成分

Table 1 Major and trace elements composition of beryl in typical ores in Na'e granite pegmatitic beryllium deposit

| 测点号 | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | BeO* | Li ₂ O* | Na ₂ O | K ₂ O |
|---------|-------------------|-------------------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|----------|----------|------------|--------------------|-------------------|------------------|
| Beryl-1 | 64.559 9 | 0.030 2 | 18.452 3 | 0.237 9 | 0.020 3 | — | 0.008 6 | 12.955 0 | 0.573 7 | 0.453 8 | — |
| Beryl-2 | 64.518 7 | — | 18.450 9 | 0.183 5 | 0.006 8 | — | — | 13.097 8 | 0.392 9 | 0.325 5 | 0.014 7 |
| Beryl-3 | 64.422 2 | — | 18.356 4 | 0.226 7 | — | — | — | 12.995 4 | 0.491 2 | 0.336 4 | — |
| Beryl-4 | 64.476 2 | — | 18.105 0 | 0.537 6 | — | 0.000 8 | — | 13.176 7 | 0.288 1 | 0.269 1 | 0.016 2 |
| Beryl-5 | 64.363 0 | — | 18.082 7 | 0.726 0 | 0.022 5 | 0.007 3 | 0.019 2 | 13.161 1 | 0.278 5 | 0.268 4 | 0.004 6 |
| Beryl-6 | 64.588 0 | — | 18.051 9 | 0.596 8 | 0.020 3 | 0.008 1 | 0.023 9 | 13.208 5 | 0.277 8 | 0.272 1 | 0.008 5 |
| 测点号 | Cs ₂ O | Rb ₂ O | P ₂ O ₅ | SnO ₂ | Y ₂ O ₃ | F | Cl | 总和 | Si | Ti | Al |
| Beryl-1 | 0.642 1 | 0.000 9 | 0.002 6 | — | — | — | 0.005 3 | 97.942 6 | 6 | 0.002 1 | 2.021 3 |
| Beryl-2 | 0.328 7 | — | — | 0.004 8 | — | — | 0.011 3 | 97.335 6 | 6 | — | 2.022 5 |
| Beryl-3 | 0.787 0 | — | — | — | — | 0.080 4 | — | 97.695 7 | 6 | — | 2.015 1 |
| Beryl-4 | 0.086 4 | — | 0.002 6 | 0.030 2 | — | — | 0.004 4 | 96.993 2 | 6 | — | 1.985 9 |
| Beryl-5 | 0.079 1 | — | 0.041 3 | — | — | 0.000 3 | 0.005 3 | 97.059 3 | 6 | — | 1.986 9 |
| Beryl-6 | 0.047 4 | — | — | — | 0.010 1 | — | — | 97.113 4 | 6 | — | 1.976 6 |
| 测点号 | Fe | Mn | Mg | Ca | Be | Li | Na | K | Cs | P | Sn |
| Beryl-1 | 0.018 5 | 0.001 6 | — | 0.000 9 | 2.892 8 | 0.107 2 | 0.081 8 | — | 0.025 4 | 0.000 2 | — |
| Beryl-2 | 0.014 3 | 0.000 5 | — | — | 2.926 5 | 0.073 5 | 0.058 7 | 0.001 7 | 0.013 0 | — | 0.000 2 |
| Beryl-3 | 0.017 7 | — | — | — | 2.908 0 | 0.092 0 | 0.060 8 | — | 0.031 3 | — | — |
| Beryl-4 | 0.041 8 | — | 0.000 1 | — | 2.946 1 | 0.053 9 | 0.048 6 | 0.001 9 | 0.003 4 | 0.000 2 | 0.001 1 |
| Beryl-5 | 0.056 6 | 0.001 8 | 0.001 0 | 0.001 9 | 2.947 8 | 0.052 2 | 0.048 5 | 0.000 5 | 0.003 1 | 0.003 3 | — |
| Beryl-6 | 0.046 4 | 0.001 6 | 0.001 1 | 0.002 4 | 2.948 1 | 0.051 9 | 0.049 0 | 0.001 0 | 0.001 9 | — | — |
| 测点号 | Y | F | Cl | Mg/Fe | Na/Li | Na/Cs | Fe+Mg+Mn | Na+K+Rb+Cs | | | |
| Beryl-1 | — | — | 0.000 1 | — | 0.762 7 | 3.213 5 | 0.020 1 | 0.107 2 | | | |
| Beryl-2 | — | — | 0.000 3 | — | 0.798 8 | 4.502 7 | 0.014 8 | 0.073 5 | | | |
| Beryl-3 | — | 0.004 2 | — | — | 0.660 3 | 1.943 6 | 0.017 7 | 0.092 0 | | | |
| Beryl-4 | — | — | 0.000 1 | 0.002 7 | 0.900 7 | 14.161 9 | 0.042 0 | 0.053 9 | | | |
| Beryl-5 | — | — | 0.000 1 | 0.017 9 | 0.929 3 | 15.428 6 | 0.059 4 | 0.052 2 | | | |
| Beryl-6 | 0.000 5 | — | — | 0.024 2 | 0.944 4 | 26.101 8 | 0.049 1 | 0.051 9 | | | |

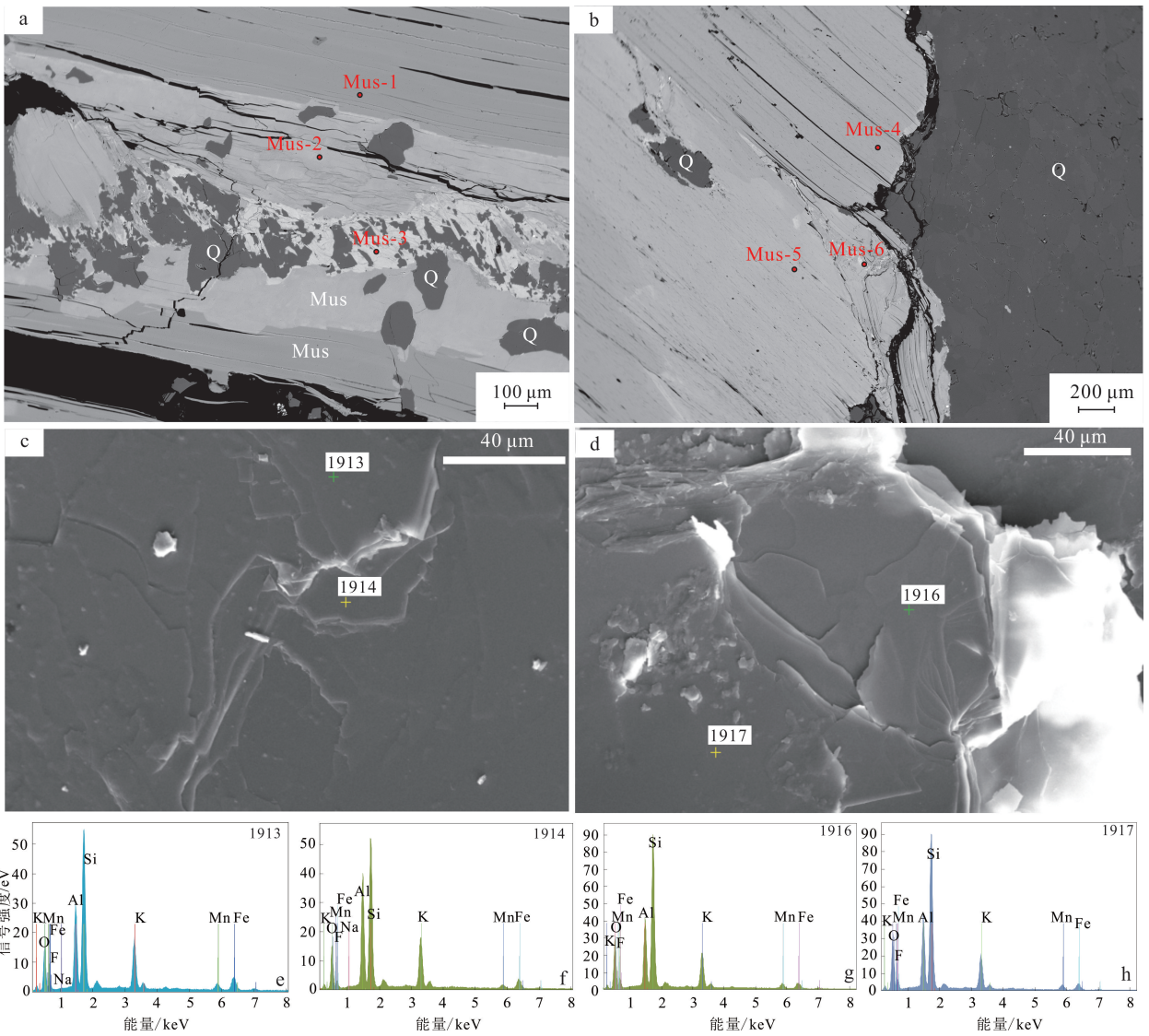
注:BeO*、Li₂O* 为计算值。绿柱石的晶体化学式以 6 个 Si 原子为基础计算。主量、微量元素质量分数单位为%。Si—Cl 为计算原子数,无量纲。

$w(\text{CaO}) \leq 0.0239\%$, Mg/Fe 值为 0~0.024 2, Na/Cs 值为 1.943 6~26.101 8, (Fe+Mg+Mn) 值极低,为 0.014 8~0.059 4, (Na+K+Rb+Cs) 值为 0.051 9~0.107 2。能谱谱系显示绿柱石具有 Fe、Mg、Si、Al、Na、O 峰特征(图 5c—h)。

3.2 云母

本区云母往往呈巨片状集合体出露于花岗伟晶岩中,粒径一般为 5~20 mm,其次呈鳞片状分布于含矿围岩中。BSE 图像显示云母往往包裹石英(图 6a、b)。云母中 $w(\text{SiO}_2)$ 为 44.664 6%~47.632 9%、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 20.687 4%~32.969 1%、 $w(\text{FeO})$ 为

3.331 0%~8.249 3%、 $w(\text{MgO})$ 为 0.014 2%~0.206 0%、 $w(\text{TiO}_2)$ 为 0.027 0%~0.175 3%、以及较高的 $w(\text{F})$, 为 1.850 1%~8.042 0%。云母中 $w(\text{Li}_2\text{O})$ 和 $w(\text{F})$ 之间存在的良好的正相关关系,因此可以通过测定云母中的 $w(\text{F})$ 来估算其 $w(\text{Li}_2\text{O})$ ^[19]。本区云母 $w(\text{Li}_2\text{O})$ 为 0.500 1%~2.427 9%(表 2), H₂O* 根据 Tindle 和 Webb^[20] 计算。此外那俄地区云母中还含有较高的 $w(\text{Rb}_2\text{O})$, 为 0.730 3%~2.304 2%, 平均为 1.375 4%, 显示云母是 Rb 元素主要寄主矿物,同时还含微量的 Cs、P 等元素, Fe/(Fe+Mg) 值为 0.946 7~0.992 4。在同一矿物不同



Q. 石英; Mus. 云母。下同。

图 6 那俄花岗伟晶岩型铍矿床中云母背散射电子图像(a、b)、二次电子图像和能谱图(c—h)

Fig.6 Image of backscattered electrons (a, b), secondary electron image and energy spectrum (c - h) of mica in Na'e granite pegmatitic beryllium deposit

位置中微量元素质量分数不一致,相比核部(Mus-1、2、5)而言,边部含更高 $w(F)$;同时 $w(Rb_2O)$ 、 $w(Li_2O)$ 与 $w(F)$ 呈正相关关系,揭示成矿流体中F元素对Rb、Li元素有一定运移、沉淀作用。能谱谱系显示云母具有Fe、Mn、Si、Al、K峰等特征,其中Fe、Mn、K具双峰(图6c—h)。Fe^T+Mn+Ti+Al^{VI}(apfu)-Mg-Li(apfu)图解(图7)显示本区云母为白云母—多硅白云母—富锂多硅白云母。

3.3 钾长石

那俄花岗伟晶岩中钾长石往往呈巨晶半自形粒

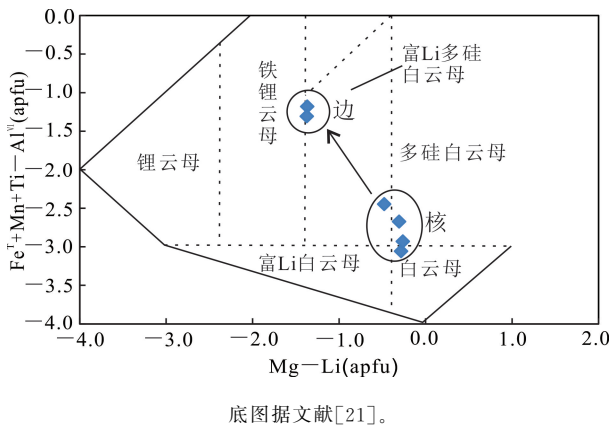
状、柱状,粒径为1~10 cm,局部达20 cm。BSE图像显示钾长石中包裹有乳滴状石英(图8a、b)。钾长石中 $w(Si_2O)$ 为63.859 3%~64.703 3%、 $w(K_2O)$ 为15.085 9%~16.433 1%、 $w(Al_2O_3)$ 为18.133 8%~18.694 3%,含微量FeO($w(FeO) < 0.07%$)、MgO ($w(MgO) < 0.015%$)、CaO ($w(CaO) < 0.05%$)。电子探针数据显示,那俄地区钾长石中还含有较高的 $w(Rb_2O)$,为0.486 1%~1.033 4%,平均为0.730 8%(表3),显示钾长石是Rb元素主要寄主矿物之一,同时还含一定量的

表 2 那俄花岗伟晶岩型铍矿床矿石中云母的主量和微量元素成分

Table 2 Major and trace elements composition of mica in typical ores in Na'e granite pegmatitic beryllium deposit

| 测点号 | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Li ₂ O* | Na ₂ O | K ₂ O |
|-------|-------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------|---------|----------------|----------|---|-------------------|------------------|
| Mus-1 | 44.664 6 | 0.101 6 | 32.969 1 | 3.331 0 | 0.578 3 | 0.014 2 | 0.003 6 | 0.500 1 | 0.575 8 | 10.353 3 |
| Mus-2 | 45.215 1 | 0.079 2 | 29.501 9 | 4.672 7 | 1.631 6 | 0.061 5 | 0.006 8 | 0.859 2 | 0.213 2 | 10.347 4 |
| Mus-3 | 46.689 0 | 0.027 0 | 20.687 4 | 7.124 5 | 2.848 6 | 0.059 7 | — | 2.337 9 | 0.079 1 | 9.784 1 |
| Mus-4 | 44.994 7 | 0.175 3 | 32.689 5 | 4.316 6 | 0.227 4 | 0.136 2 | 0.031 0 | 0.513 8 | 0.398 5 | 10.208 5 |
| Mus-5 | 45.230 4 | 0.068 3 | 31.319 6 | 5.216 4 | 0.376 1 | 0.137 6 | 0.005 7 | 0.587 8 | 0.278 1 | 10.979 2 |
| Mus-6 | 47.632 9 | 0.100 1 | 20.741 8 | 8.249 3 | 0.945 0 | 0.206 0 | 0.015 4 | 2.427 9 | 0.100 1 | 10.222 9 |
| 测点号 | Cs ₂ O | Rb ₂ O | P ₂ O ₅ | H ₂ O* | F | Cl | 总和 | O | Si | Ti |
| Mus-1 | 0.005 6 | 0.984 0 | 0.007 7 | 3.469 3 | 1.850 1 | 0.009 6 | 94.667 4 | 22 | 6.158 4 | 0.010 5 |
| Mus-2 | 0.706 5 | 1.676 7 | 0.012 8 | 2.864 0 | 3.003 6 | — | 95.864 3 | 22 | 6.322 9 | 0.008 3 |
| Mus-3 | 1.268 6 | 2.304 2 | — | 0.425 9 | 7.753 0 | — | 95.360 9 | 22 | 6.825 7 | 0.003 0 |
| Mus-4 | — | 0.730 3 | — | 3.470 0 | 1.893 9 | — | 95.004 6 | 22 | 6.177 0 | 0.018 1 |
| Mus-5 | 0.240 6 | 1.019 5 | — | 3.340 1 | 2.131 6 | 0.004 4 | 96.109 0 | 22 | 6.232 3 | 0.007 1 |
| Mus-6 | 0.683 2 | 1.537 6 | 0.010 2 | 0.336 7 | 8.042 0 | 0.001 2 | 95.101 4 | 22 | 6.882 9 | 0.010 9 |
| 测点号 | Al ^{IV} | Al ^{VI} | Fe ^T | Mn | Mg | Ca | Li | Na | K | Cs |
| Mus-1 | 1.841 6 | 3.516 5 | 0.384 1 | 0.067 5 | 0.002 9 | 0.000 5 | 0.277 3 | 0.153 9 | 1.820 8 | 0.000 3 |
| Mus-2 | 1.677 1 | 3.185 7 | 0.546 5 | 0.193 3 | 0.012 8 | 0.001 0 | 0.483 3 | 0.057 8 | 1.845 7 | 0.042 1 |
| Mus-3 | 1.174 3 | 2.390 5 | 0.871 1 | 0.352 8 | 0.013 0 | — | 1.374 7 | 0.022 4 | 1.824 5 | 0.079 1 |
| Mus-4 | 1.823 0 | 3.466 6 | 0.495 6 | 0.026 4 | 0.027 9 | 0.004 6 | 0.283 7 | 0.106 1 | 1.787 6 | — |
| Mus-5 | 1.767 7 | 3.319 0 | 0.601 1 | 0.043 9 | 0.028 3 | 0.000 8 | 0.325 7 | 0.074 3 | 1.929 6 | 0.014 1 |
| Mus-6 | 1.117 1 | 2.415 6 | 0.996 9 | 0.115 7 | 0.044 4 | 0.002 4 | 1.411 1 | 0.028 0 | 1.884 2 | 0.042 1 |
| 测点号 | Rb | P | OH* | F | Cl | Fe/ (Fe+Mg) | Mg-Li | Fe ^T +Mn+ Ti-Al ^{VI} | K/Rb | |
| Mus-1 | 0.087 2 | 0.000 8 | 3.191 0 | 0.806 8 | 0.002 2 | 0.992 4 | -0.274 4 | -3.054 3 | 20.880 7 | |
| Mus-2 | 0.150 7 | 0.001 4 | 2.671 6 | 1.328 4 | — | 0.977 2 | -0.470 5 | -2.437 6 | 12.247 5 | |
| Mus-3 | 0.216 6 | — | 0.415 3 | 3.584 7 | — | 0.985 2 | -1.361 7 | -1.163 7 | 8.423 4 | |
| Mus-4 | 0.064 5 | — | 3.177 7 | 0.822 3 | — | 0.946 7 | -0.255 8 | -2.926 5 | 27.714 7 | |
| Mus-5 | 0.090 3 | — | 3.070 1 | 0.928 9 | 0.001 0 | 0.955 1 | -0.297 5 | -2.666 9 | 21.368 8 | |
| Mus-6 | 0.142 8 | 0.001 1 | 0.324 6 | 3.675 1 | 0.000 3 | 0.957 4 | -1.366 7 | -1.292 1 | 13.194 7 | |

注:Li₂O*、H₂O*为计算值。云母的晶体化学式以 22 个 O 原子为基础计算。主量、微量元素质量分数单位为%。Al^{IV},四价铝原子; Al^{VI},六价铝原子;Fe^T,全铁原子。O—Cl 为计算原子数,无量纲。



底图据文献[21]。

图 7 那俄花岗伟晶岩型铍矿床中云母 Fe^T + Mn + Ti - Al^{IV} (apfu) - Mg - Li (apfu) 图解

Fig.7 Fe^T + Mn + Ti - Al^{IV} (apfu) - Mg - Li (apfu) diagram of mica in Na'e granite pegmatitic beryllium deposit

$w(\text{Cs}_2\text{O})$, 为 0.090 9% ~ 0.153 4%, K/Na 值为 13.334 8 ~ 35.709 6, Or 值为 92.890 0 ~ 97.280 0。以 8 个 O 原子为基准,通过理论计算,本区钾长石分子式为 $\text{K}_{0.8932\sim 0.9713} [\text{Al}_{1.0013\sim 1.0151} \text{Si}_{2.9809\sim 2.9990} \text{O}_8]$ 。能谱谱系显示钾长石以 Si、Al、K 峰等为特征,其中 K 具双峰(图 8c—h)。

3.4 石榴子石

那俄地区含矿花岗伟晶岩往往发育有棕色石榴子石,肉眼可见粒径一般为 0.2 ~ 1.0 mm,少数为 2.0 ~ 5.0 mm,呈四角三八面体自形粒状集合体分布于造岩矿物中。在 BSE 图像上环带结构不明显(图 9a),能谱谱系以发育 Mn、Fe 双峰为特征(图 9b—d)。石榴子石中 $w(\text{SiO}_2)$ 为 35.588 6% ~ 35.939 5%、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 20.302 2% ~ 20.496 0%、

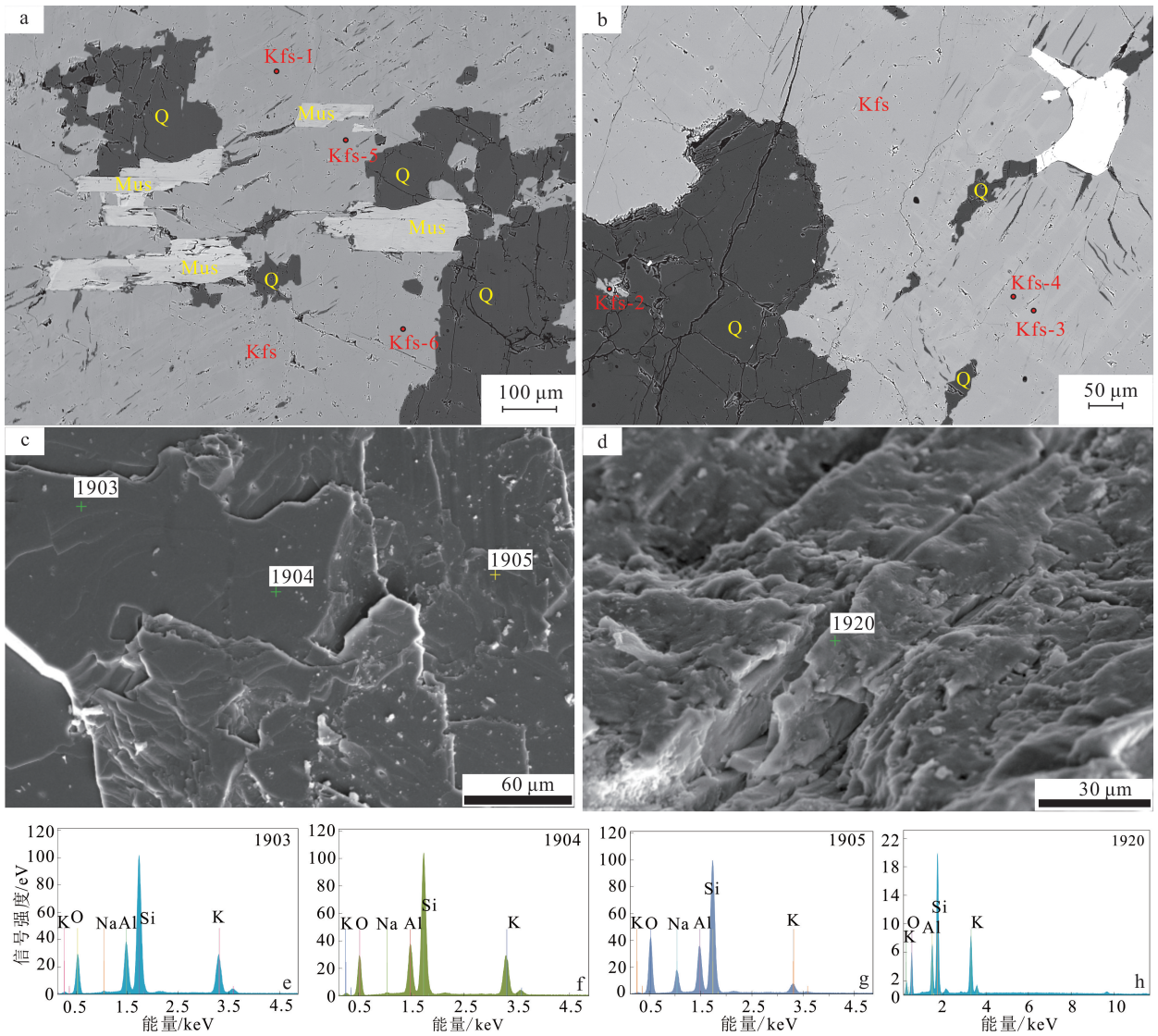


图 8 那俄花岗伟晶岩型铍矿床中钾长石背散射电子图像(a、b)、二次电子图像和能谱图(c—h)

Fig.8 Image of backscattered electrons (a, b), secondary electron image and energy spectrum (c - h) of K-feldspar in Na'eg granite pegmatitic beryllium deposit

$w(\text{FeO})$ 为 14.026 9% ~ 14.567 5%、 $w(\text{MnO})$ 为 28.663 9% ~ 29.627 6%，含微量 K_2O ($w(\text{K}_2\text{O}) < 0.04\%$)、 MgO ($w(\text{MgO}) < 0.01\%$)、 CaO ($w(\text{CaO}) < 0.3\%$)。端元组分主要为铝质石榴子石系列，以锰铝榴石和铁铝榴石(Alm)为主，锰铝榴石体积分数为 67.02% ~ 69.07% (表 4)。

4 讨论

4.1 绿柱石对成矿作用的指示

铍在大部分造岩矿物中具有高度不相容性，极易进入晚期花岗质熔体内，并在其演化晚期得以高度富集。绿柱石的内部构造及其微量元素 Na、Cs、Li、Fe 等质量分数变化可以指示伟晶岩的分异程

度，甚至示踪其岩浆—热液演化过程^[18,22]。通常认为，随伟晶岩岩浆分异演化程度升高，绿柱石 $w(\text{FeO})$ 降低^[23]，原生绿柱石的 $w(\text{Cs})$ 升高，Na/Li 值和 Na/Cs 值降低， $w(\text{Mg})$ 降低，Mg/Fe 值降低^[22,24]；绿柱石 $w(\text{FeO})$ 与 Na/Cs 值呈线性正相关，与 $w(\text{Cs}_2\text{O})$ 呈负相关^[23]。那俄地区绿柱石中 $w(\text{FeO})$ 为 0.183 5% ~ 0.726 0%，Na/Cs 值为 1.943 6 ~ 26.101 8。在 $w(\text{Cs}_2\text{O})$ — $w(\text{FeO})$ 图解(图 10a)中铍矿化与锂矿化过渡阶段，与近年南岭地区发现的含绿柱石花岗伟晶岩具有相似的演化过程(图 10b)，含绿柱石花岗伟晶岩具有较高的分异演化程度^[26]。

表 3 那俄花岗伟晶岩型铍矿床矿石中钾长石的主量和微量元素成分

Table 3 Major and trace elements composition of K-feldspar in typical ores in Na'e granite pegmatitic beryllium deposit

| 测点号 | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | Cs ₂ O | Rb ₂ O |
|-------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|----------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Kfs-1 | 64.583 7 | — | 18.367 0 | 0.031 0 | 0.029 3 | — | 0.030 7 | 0.771 5 | 15.643 9 | 0.093 3 | 0.813 8 |
| Kfs-2 | 64.593 4 | — | 18.393 5 | — | — | — | — | 0.302 7 | 16.433 1 | 0.115 9 | 0.486 1 |
| Kfs-3 | 64.632 2 | — | 18.339 3 | 0.050 9 | — | — | — | 0.687 9 | 15.085 9 | 0.144 2 | 0.533 5 |
| Kfs-4 | 64.703 3 | 0.072 4 | 18.694 3 | — | — | 0.013 0 | 0.020 8 | 0.658 0 | 15.899 6 | 0.132 9 | 0.542 0 |
| Kfs-5 | 63.859 3 | — | 18.133 8 | 0.068 6 | 0.015 7 | — | — | 0.644 0 | 15.588 1 | 0.153 4 | 0.975 9 |
| Kfs-6 | 63.969 2 | — | 18.217 8 | — | — | 0.011 6 | — | 0.604 5 | 15.921 4 | 0.090 9 | 1.033 4 |
| 测点号 | P ₂ O ₅ | Y ₂ O ₃ | 总和 | O | Si | Ti | Al | Fe | Mn | Mg | Ca |
| Kfs-1 | 0.036 0 | — | 100.400 1 | 8 | 2.989 8 | — | 1.002 2 | 0.001 2 | 0.001 1 | — | 0.001 5 |
| Kfs-2 | 0.020 5 | — | 100.345 1 | 8 | 2.992 0 | — | 1.004 2 | — | — | — | — |
| Kfs-3 | 0.087 4 | — | 99.561 4 | 8 | 2.999 0 | — | 1.003 0 | 0.002 0 | — | — | — |
| Kfs-4 | 0.025 7 | — | 100.761 9 | 8 | 2.980 9 | 0.002 5 | 1.015 1 | — | — | 0.000 9 | 0.001 0 |
| Kfs-5 | — | 0.006 7 | 99.445 5 | 8 | 2.991 5 | — | 1.001 3 | 0.002 7 | 0.000 6 | — | — |
| Kfs-6 | 0.036 0 | — | 99.884 8 | 8 | 2.986 8 | — | 1.002 6 | — | — | 0.000 8 | — |
| 测点号 | Na | K | Cs | Rb | P | Y | K/Na | K/Rb | An | Ab | Or |
| Kfs-1 | 0.069 3 | 0.924 1 | 0.001 8 | 0.024 2 | 0.001 4 | — | 13.334 8 | 38.186 0 | 0.150 0 | 6.960 0 | 92.890 0 |
| Kfs-2 | 0.027 2 | 0.971 3 | 0.002 3 | 0.014 5 | 0.000 8 | — | 35.709 6 | 66.986 2 | — | 2.720 0 | 97.280 0 |
| Kfs-3 | 0.061 9 | 0.893 2 | 0.002 9 | 0.015 9 | 0.003 4 | — | 14.429 7 | 56.176 1 | — | 6.480 0 | 93.520 0 |
| Kfs-4 | 0.058 8 | 0.934 7 | 0.002 6 | 0.016 1 | 0.001 0 | — | 15.896 3 | 58.055 9 | 0.100 0 | 5.910 0 | 93.990 0 |
| Kfs-5 | 0.058 5 | 0.931 8 | 0.003 1 | 0.029 4 | — | 0.000 2 | 15.928 2 | 31.693 9 | — | 5.910 0 | 94.090 0 |
| Kfs-6 | 0.054 7 | 0.948 6 | 0.001 8 | 0.031 0 | 0.001 4 | — | 17.341 9 | 30.600 0 | — | 5.460 0 | 94.540 0 |

注:钾长石的晶体化学式以 8 个 O 原子为基础计算。主量、微量元素质量分数单位为%。O—Y 为计算原子数,无量纲。

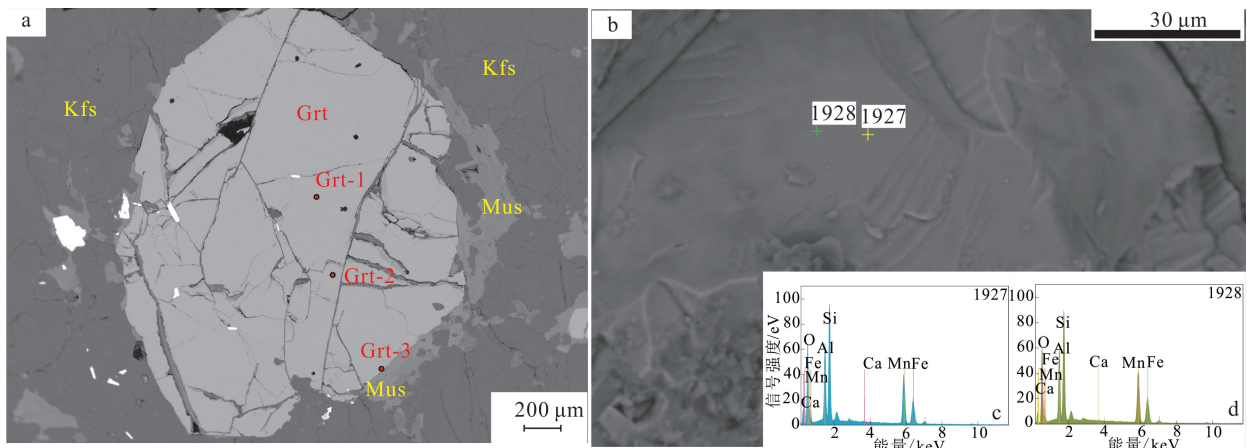


图 9 那俄花岗伟晶岩型铍矿床中石榴子石背散射电子图像(a)、二次电子图像和能谱图(b—d)

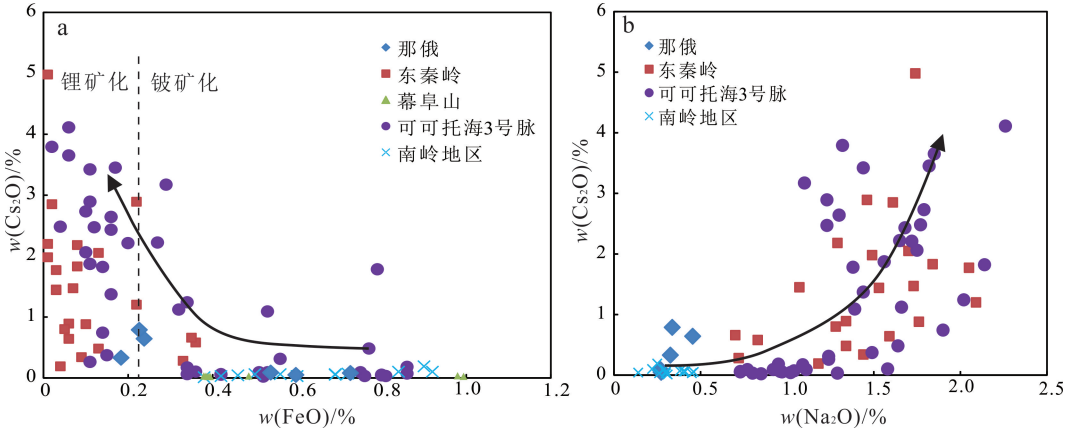
Fig.9 Image of backscattered electrons (a), secondary electron image and energy spectrum (b—d) of garnet in Na'e granite pegmatitic beryllium deposit

表 4 那俄花岗伟晶岩型铍矿床矿石中石榴子石的主量和微量元素成分

Table 4 Major and trace elements composition of garnet in typical ores in Na'e granite pegmatitic beryllium deposit

| 测点号 | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | NiO |
|-------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|----------|------------------|------------------|---------|-------------------|------------------|-------------------------------|---------|
| Grt-1 | 35.939 5 | 0.062 6 | 20.302 2 | 14.502 1 | 28.987 5 | 0.003 9 | 0.251 5 | 0.011 6 | 0.002 9 | — | 0.028 6 |
| Grt-2 | 35.738 1 | — | 20.406 7 | 14.567 5 | 28.663 9 | 0.008 1 | 0.299 3 | — | 0.034 6 | — | — |
| Grt-3 | 35.588 6 | 0.025 0 | 20.496 0 | 14.026 9 | 29.627 6 | — | 0.255 4 | 0.012 5 | 0.009 6 | — | — |
| 测点号 | Cr ₂ O ₃ | 总和 | Si | Ti | Al ^{IV} | Al ^{VI} | Fe | Mn | Mg | Ca | Na |
| Grt-1 | 0.004 9 | 100.097 2 | 2.977 0 | 0.003 9 | 0.028 6 | 1.947 1 | 1.004 7 | 2.033 9 | 0.000 5 | 0.022 3 | 0.001 9 |
| Grt-2 | — | 99.718 3 | 2.970 5 | — | 0.040 5 | 1.951 2 | 1.012 6 | 2.018 1 | 0.001 0 | 0.026 7 | — |
| Grt-3 | — | 100.041 6 | 2.954 0 | 0.001 6 | 0.059 7 | 1.935 0 | 0.973 7 | 2.083 1 | — | 0.022 7 | 0.002 0 |
| 测点号 | K | P | Ni | Cr | Ura | Pyr | Spe | And | Gro | Alm | Ski |
| Grt-1 | 0.000 3 | — | 0.001 9 | 0.000 3 | 0.02 | 0.02 | 67.58 | 0.76 | — | 27.38 | 3.29 |
| Grt-2 | 0.003 7 | — | — | — | — | 0.03 | 67.02 | 0.95 | — | 27.14 | 3.52 |
| Grt-3 | 0.001 0 | — | — | — | — | — | 69.07 | 0.80 | — | 22.70 | 5.43 |

注:石榴子石的晶体化学式以 12 个 O 原子为基础计算。主量、微量元素质量分数单位为%。Si—Cr 为计算原子数,无量纲。Ura. 钙铀榴石;Pyr. 镁铝榴石;Spe. 锰铝榴石;And. 钙铁榴石;Gro. 钙铝榴石;Alm. 铁铝榴石;Ski. 铁榴石;矿物体积分数单位为%。



东秦岭据文献[23];幕阜山据文献[25];可可托海 3 号脉据文献[17,26];南岭地区据文献[27]。

图 10 那俄花岗伟晶岩型铍矿床中绿柱石 w(Cs₂O)-w(FeO) (a)和 w(Cs₂O)-w(Na₂O) (b) 图解

Fig.10 w(Cs₂O)-w(FeO) (a) and w(Cs₂O)-w(Na₂O) (b) diagrams of beryl in Na'e granite pegmatitic beryllium deposit

4.2 白云母对成矿作用的指示

云母矿物因其具有特殊的层状结构可以容纳多种碱金属阳离子作为稀有金属载体矿物,如 Li、Nb、Ta、Sn、Rb、Cs 等,是稀有金属成矿标志性矿物^[28-29]。云母矿物对结晶介质化学条件的敏感,能够指示伟晶岩熔体的演化程度、伟晶岩脉的演化过程和结晶条件,并为伟晶岩脉的稀有金属矿化潜力提供信息^[30-32],云母矿物中挥发性元素 Li、F 和不相容元素 Rb、Cs 质量分数会随着岩浆演化程度的升高而增大,K/Rb 和 K/Cs 值会降低^[30,33-34]。研究显示富集 Be 矿的绿柱石型伟晶岩中云母 K/Rb 值为 20~50,Cs、Rb 质量分数较高,分别为(100~

500)×10⁻⁶、(1 500~10 000)×10⁻⁶^[35]。

本文研究的那俄含绿柱石花岗伟晶岩中白云母 w(F)为 1.850 1%~8.042 0%,K/Rb 值为 8.423 4~27.714 7,与仁里地区明显富集 F、Li、Rb 等元素的锂电石-锂云母伟晶岩中云母相似^[27],接近可可托海 3 号脉锂云母 w(F)(5.51%~8.06%)^[36],显示含绿柱石花岗伟晶岩原始岩浆演化程度高于 Be 矿的绿柱石型伟晶岩,接近至铌钽矿-锂矿伟晶岩演化程度^[35]。白云母颗粒边缘 F、Li、Rb、Cs 等元素质量分数远高于颗粒内部的质量分数,w(F)与稀有金属元素质量分数呈正相关关系,由于富 Li-F 流体的作用,原生白云母发生了交代反应形成了富锂

的云母^[37],显示富含F的成矿流体对Cs、Rb、Li元素运移、沉淀具有重大的作用。

4.3 钾长石对成矿作用的指示

钾长石中K、Rb、Cs等元素质量分数的变化与伟晶岩脉的演化程度相关,钾长石中K/Rb值随着岩浆演化程度的升高而降低,Rb、Cs质量分数增高^[35]。我国南方幕阜山地区出露多期伟晶岩脉,含绿柱石伟晶岩中钾长石K/Rb值为127,锂云母伟晶岩中钾长石K/Rb值为65^[27]。本文研究的那俄含绿柱石伟晶岩中钾长石K/Rb值为30.60~66.99,接近于幕阜山锂云母伟晶岩,绿柱石、云母、石榴子石和钾长石均揭示本区伟晶岩演化阶段处于铍-锂矿化阶段,为演化晚期的产物,具有较高的分异演化程度。

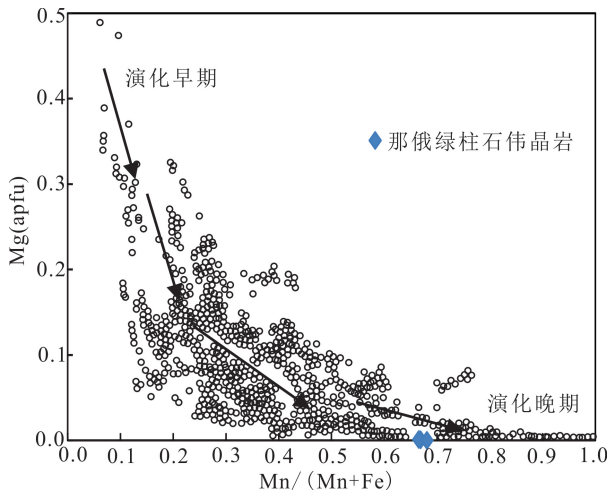
那俄地区含绿柱石花岗伟晶岩中钾长石、云母颗粒边缘都显示较颗粒内部具有更高的Rb、Cs质量分数,显示演化晚期成矿流体在长石、云母颗粒边缘发生了交代作用,明显富集稀有金属元素。绿柱石中Li质量分数受控于岩浆中Li富集程度和晶体形成条件^[38],绿柱石能一定程度上反映源区中Li的富集程度。演化程度较高的伟晶岩岩浆中产出的绿柱石具有较高的Cs质量分数和Cs/Na值。本区花岗伟晶岩中绿柱石 $w(\text{Cs}_2\text{O})$ 为0.0474%~0.7870%, $w(\text{Li}_2\text{O})$ 为0.2778%~0.5737%,这显示了那俄绿柱石结晶时,岩浆体系中的Li并未富集,而含绿柱石伟晶岩中云母颗粒边缘Li明显富集(约10倍),揭示了在伟晶岩演化晚期,岩浆中有高度富集F-Li流体出现,与钾长石、云母发生交代作用,在矿物颗粒边缘产生明显富稀有金属元素的现象,在原生白云母颗粒边缘转变生成富锂多硅白云母(图7)。

4.4 石榴子石对成矿作用的指示

那俄地区含绿柱石花岗伟晶岩普遍发育石榴子石。一般认为,熔体组分^[39]和共生矿物^[40]是岩浆成因的石榴子石主要控制因素,在 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 共存的岩浆中, Mn^{2+} 总是被优先结合进入石榴子石^[41-42],通常形成铁铝榴石-锰铝榴石,锰铝榴石端元比例随着岩浆演化程度增加而增大^[43]。变质成因的石榴子石成分受温度和压力控制,在较高压力和较低温度下结晶的石榴子石具有较高的Ca质量分数^[44]。花岗质岩类中以锰铝榴石为主的石榴子石系列形成于低 $p-t$ 环境^[45];花岗岩中的铁铝榴石-锰铝榴石固溶体通常具有环带结构,而伟晶岩

和细晶岩中的铁铝榴石-锰铝榴石固溶体组成较稳定且无明显分带^[46]。稀有金属花岗伟晶岩中石榴子石固溶体系列中的锰铝榴石组分可高达80%以上^[47-49],伟晶岩中锰铝榴石的出现往往伴随着锂矿化,而无矿伟晶岩中则以铁铝榴石为主,锰铝榴石与Li矿化具有一定的相关性^[39,47-48]。具锂矿化的伟晶岩中石榴子石表现出富集Mn且贫Fe的特征,而不具锂矿化的伟晶岩中石榴子石则相对低Mn高Fe,锰铝榴石只可能出现在锂矿化伟晶岩中^[47]。那俄地区含矿花岗伟晶岩固结指数 I_s 值为0.11~1.38,伟晶岩中石榴子石为锰铝-铁铝榴石固溶体系列,镁铝榴石和钙铝榴石比例极低($<1\%$)。锰铝-铁铝榴石系列中又以锰铝榴石为主,体积分数为67.02%~69.07%。那俄地区发现的18条含绿柱石花岗伟晶岩脉均发育有棕色石榴子石,而不含绿柱石的花岗伟晶岩中几乎不含石榴子石,显示本区石榴子石与稀有金属矿化存在一定的相关性,故石榴子石可作为花岗伟晶岩发育稀有金属矿化的指示矿物,高Mn质量分数的锰铝榴石很可能是伟晶岩中发生锂矿化的矿物学标志^[45]。无矿花岗伟晶岩到白云母稀有金属伟晶岩,石榴子石中 $w(\text{MnO})/w(\text{MnO}+\text{FeO})$ 值呈增大趋势^[50],随着岩浆演化,石榴子石的Mn/Fe值亦增大^[39],伟晶岩中石榴子石普遍的演化趋势为Mn质量分数增大而Fe质量分数降低^[42,46],而稀有金属伟晶岩岩浆通常向富Mn和Ta的方向演化^[51],形成铈钽矿化。

那俄地区含矿花岗岩伟晶岩中石榴子石 $w(\text{MnO})$ 为28.6639%~29.6276%,Mn/Fe值为1.99~2.14,从核部至边缘, $w(\text{MnO})$ 先降低后升高,边缘 $w(\text{MnO})$ (29.6276%)高于核部 $w(\text{MnO})$ (28.9875%),揭示石榴子石边缘发生岩浆演化成矿流体交代作用。与新疆阿尔泰地区早期含锂矿伟晶岩石榴子石相比,本区石榴子石的 $w(\text{MnO})$ 低于新疆阿尔泰地区早期含锂矿伟晶岩石榴子石的 $w(\text{MnO})$ (30.69%~39.24%)和Mn/Fe值(2.35~9.04)^[45],与晚期铈钽矿化伟晶岩石榴子石的 $w(\text{MnO})$ (27.10%~30.02%)^[45]和Mn/Fe值(1.88~2.27)相似,揭示本区含绿柱石花岗伟晶岩为伟晶岩演化晚期,与手标本零星出现铈钽矿化相符。在Mg-Mn/(Fe+Mn)图解(图11)中显示本区石榴子石为演化晚期的产物,并经历了成矿流体的交代作用。



底图据文献[32]。

图 11 那俄花岗伟晶岩石榴子石演化图解

Fig.11 Evolution diagram of garnet in Na'e pegmatitic

5 结论

1)那俄铍矿区内共发现花岗伟晶岩脉 70 条,含绿柱石花岗伟晶岩有 18 条,圈定矿体 15 条,其中 KT4、KT6 为主矿体。矿体赋存于石榴子石钠长石化花岗伟晶岩脉中。矿体长为 100~1150 m,厚度为 0.43~3.70 m, $w(\text{BeO})$ 为 0.007%~1.790%, $w(\text{Ta}_2\text{O}_5)$ 为 0.003 2%~0.053 3%, $w(\text{Rb}_2\text{O})$ 为 0.070%~0.235%。以铍矿为主,共伴生钽、铷矿;少数以钽矿为主,共伴生铍、铷矿。矿石矿物以绿柱石、铌钽铁矿、白云母、钾长石为主,区内最明显的找矿标志是含绿柱石伟晶岩,其次是含石榴子石钠长石化伟晶岩。

2)电子探针分析显示,绿柱石属于无碱绿柱石—低碱绿柱石,分子式为 $\text{Be}_{2.8928\sim 2.9481}\text{Al}_{1.9766\sim 2.0225}\text{Si}_6\text{O}_{18}$;云母中 $w(\text{Li}_2\text{O})$ 为 0.500 1%~2.427 9%, $w(\text{Rb}_2\text{O})$ 为 0.730 3%~2.304 2%,平均为 1.38%,属白云母—多硅白云母—富锂多硅白云母;钾长石中含有较高的 $w(\text{Rb}_2\text{O})$,为 0.486 1%~1.033 4%,平均为 0.73%,其分子式为 $\text{K}_{0.8932\sim 0.9713}[\text{Al}_{1.0013\sim 1.0151}\text{Si}_{2.9809\sim 2.9990}\text{O}_8]$;石榴子石能谱谱系以发育 Mn、Fe 双峰为特征,端元组分主要为铝质石榴子石系列,以锰铝榴石(Spe)和铁铝榴石(Alm)为主,锰铝榴石占比达 67.02%~69.07%,属岩浆成因锰铝榴石。本区 Be 元素主要赋存于绿柱石中,Rb 元素赋存于钾长石和白云母中,Li 元素赋存于白云母—多硅白云母—富锂多硅白云母中。

3)白云母和绿柱石成分显示那俄地区花岗质岩浆初始 Li 并不富集,在伟晶岩演化晚期岩浆中有高度富集 F-Li 流体活动是该地区稀有金属异常富集的重要因素。

致谢:崔子良、张兴恒、陈明伟等项目监审专家在项目执行过程中给予了指导和帮助,在此表示衷心感谢。恰逢母校七十华诞,远在祖国西南边陲的学子祝福母校原长春地质学院光辉历程更辉煌,人才辈出代代强,桃李满天下扬四海,硕果累累振中华!感谢母校教育之恩!

参考文献(References):

- [1] 王瑞江,王登红,李建康,等. 稀有稀土稀散矿产资源及其开发利用[M].北京:地质出版社,2015:39-52.
Wang Ruijiang, Wang Denghong, Li Jiankang, et al. Rare Rare Earth Scattered Mineral Resources and Their Exploitation and Utilization [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015:39-52.
- [2] 王登红,王瑞江,孙艳,等. 我国三稀(稀有稀土稀散)矿产资源调查研究成果综述[J].地球学报,2016,37(5):569-580.
Wang Denghong, Wang Ruijiang, Sun Yan, et al. A Review of Achievements in the Three-Type Rare Mineral Resources (Rare Resources, Rare Earth and Rarely Scattered Resources) Survey in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(5):569-580.
- [3] 付建刚,李光明,王根厚,等. 西藏错那穹窿同构造矽卡岩特征及相关铍钨锡稀有金属矿化的成矿时代[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(5):1304-1322.
Fu Jiangan, Li Guangming, Wang Genhou, et al. Syntectonic Skarn Characteristics and Mineralization Age of Associated Be-W-Sn Rare Metal Deposit in Cuonadong Dome, Southern Tibet, China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(5):1304-1322.
- [4] 李再会,唐发伟,林仕良,等. 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), 2014, 44(2):554-565.
Li Zaihui, Tang Fawei, Lin Shiliang, et al. Zircon La-ICP-MS U-Pb Geochronology of the Beryl-Bearing Pegmatite and Its Geological Significance, Western Yunnan, Southwest China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(2):554-565.
- [5] 张婷婷,董国振,安玉伟,等. 通化地区中生代大川花岗

- 岩体成因与 REE 赋存状态:来自岩石地球化学、锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素制约[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(3):946-963.
- Zhang Tingting, Dong Guozhen, An Yuwei, et al. Petrogenesis and REE Occurrence State of Mesozoic Dachuan Alkaline Granite in Tonghua Area: Constraints from Geochemistry, Zircon U-Pb Dating and Hf Isotope[J].Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023,53(3):946-963.
- [6] 李世金,曾小平,王富春,等.青海省主要成矿系列与找矿前景[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(5):1419-1445.
- Li Shijin, Zeng Xiaoping, Wang Fuchun, et al. Main Metallogenic Series and Prospecting Potential in Qinghai Province[J].Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022,52(5):1419-1445.
- [7] 姚玉增,李立兴,付建飞,等.华北克拉通辽宁李家堡子早前寒武纪花岗伟晶岩型铍钽成矿的年龄证据[J].地质通报,2023,42(6):1047-1049.
- Yao Yuzeng, Li Lixing, Fu Jianfei, et al. Geochronological Constraints on Early Precambrian Granitic Pegmatite Type Nb-Ta Mineralization of the Lijiapuzi Deposit in North China Craton[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(6): 1047-1049.
- [8] 唐文龙,付超,王杰,等.莫桑比克上利戈尼亚钽-铌稀有元素成矿带成矿规律及资源潜力[J].地质通报,2022,41(7):1269-1281.
- Tang Wenlong, Fu Chao, Wang Jie, et al. Metallogenic Regularity and Resources Potential of Alto Ligonha Ta-Nb Rare Element Metallogenic Belt in Mozambique[J].Geological Bulletin of China, 2022, 41(7): 1269-1281.
- [9] 刘承先,孙丰月,钱焯,等.青海柴北缘地区茶卡北山铍稀有金属伟晶岩型矿床垂向分带特征[J].世界地质,2021,40(4):847-859,880.
- Liu Chengxian, Sun Fengyue, Qian Ye, et al. Vertical Zonation Characteristics of Chakabeishan Li-Be Rare-Metal Pegmatite Deposit in Northern Margin of Qaidam Basin, Qinghai Province[J]. World Geology, 2021,40(4):847-859,880.
- [10] 刘俊鹏,王蝶,丁志丹,等.滇西剑川新生代富碱岩浆岩 Li 同位素地球化学特征及其对岩浆源区的制约[J].世界地质,2023,42(4):636-649.
- Liu Junpeng, Wang Die, Ding Zhidan, et al. Li Isotopic Geochemical Characteristics of Cenozoic Alkali-Rich Magmatic Rocks and Constraints on Magmatic Source Region in Jianchuan, Western Yunnan [J]. World Geology, 2023,42(4):636-649.
- [11] 张家旺,王建国,张国亮,等.大兴安岭地区花岗岩型稀有稀土金属矿化信息多光谱遥感解译研究:以内蒙古科右中旗阿里乌拉地区为例[J].世界地质,2022,41(3):536-544.
- Zhang Jiawang, Wang Jianguo, Zhang Guoliang, et al. Multispectral Remote Sensing Interpretation of Granite-Type Rare Earth Metals Information in Daxing'anling Area: Case Study with Aliura Area in Keyouzhongqi, Inner Mongolia [J]. World Geology, 2022,41(3):536-544.
- [12] 张传昱,曹晓民,李文昌,等.云南省铍矿床成矿规律初探[J].岩石矿物学杂志,2021,40(2):452-464.
- Zhang Chuanyu, Cao Xiaomin, Li Wenchang, et al. A Preliminary Study of Metallogenic Regularity of Beryllium Deposits in Yunnan Province [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2021,40(2):452-464.
- [13] 燕利军,王胜江,陈曹军,等.滇西梁河县新发现那俄铍矿岩石地球化学特征及铍成矿事件[J].地质与勘探,2021,57(4):739-750.
- Yan Lijun, Wang Shengjiang, Chen Caojun, et al. Geochemistry of Granite, Tectonic Environment and Ore-Forming Event of the New-Found Nae Beryllium Deposit in the Lianghe Area, Western Yunnan [J]. Geology and Exploration, 2021,57(4):739-750.
- [14] 余勇,李祖福,白令安,等.滇西伟晶岩型稀有金属矿床成矿规律与找矿方向[J].岩石学报,2022,38(7):2052-2066.
- Yu Yong, Li Zufu, Bai Ling'an, et al. Metallogenic Regularity and Prospecting Direction of Pegmatitic Rare-Metal Deposits in Western Yunnan [J]. Acta Petrologica Sinica, 2022,38(7):2052-2066.
- [15] 张文兰,车旭东,王汝成,等.超轻元素 Be 元素的电子探针定量分析:以绿柱石为例[J].科学通报,2020,65(28/29):3205-3216.
- Zhang Wenlan, Che Xudong, Wang Rucheng, et al. Optimum Conditions for Quantitative Analysis of Beryllium by Electron Probe Microanalysis: A Case Study of Beryl [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(28/29):3205-3216.
- [16] 张文兰,汤志敏,胡欢,等.含超轻元素 Be 矿物的电子探针定量分析:测试条件的约束[J].岩石学报,2022,38(7):1879-1889.
- Zhang Wenlan, Tang Zhimin, Hu Huan, et al. Quantitative Analysis of Ultra-Light Elements Beryllium by Electron Microprobe: Constraints of Analysis Conditions [J]. Acta Petrologica Sinica, 2022,

- 38(7): 1879 - 1889.
- [17] Wang R C, Chen X D, Zhang W L, et al. Geochemical Evolution and Late Re-equilibration of Na - Cs - Rich Beryl from the Koktokay # 3 Pegmatite (Altai, NW China) [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2009, 21: 795 - 809.
- [18] Černý P. Alkali Variations in Pegmatitic Beryl and Their Petrogenetic Implications [J]. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen*, 1975, 123: 198 - 212.
- [19] Monier G, Robert J L. Evolution of the Miscibility Gap Between Muscovite and Biotite Solid Solutions with Increasing Lithium Content; An Experimental Study in the System $K_2O - Li_2O - MgO - FeO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O - HF$ at 600°C, 2 kbar P_{H_2O} : Comparison with Natural Lithium Micas [J]. *Mineralogical Magazine*, 1986, 50: 641 - 651.
- [20] Tindle A G, Webb P C. Estimation of Lithium Contents in Trioctahedral Micas Using Microprobe Data: Application to Micas from Granitic Rocks [J]. *European Journal of Mineralogy*, 1990, 2(5): 595 - 610.
- [21] Tischendorf G, Gottesmann B, Foerster H J, et al. On Li-Bearing Micas: Estimating Li from Electron Microprobe Analyses and an Improved Diagram for Graphical Representation [J]. *Mineral Magazine*, 1997, 61(6): 809 - 834.
- [22] Černý P, Anderson A J, Tomascak P B, et al. Geochemical and Morphological Features of Beryl from the Bikita Granitic Pegmatite, Zimbabwe [J]. *The Canadian Mineralogist*, 2003, 41: 1003 - 1011.
- [23] 周起凤, 秦克章, 唐冬梅, 等. 东秦岭卢氏稀有金属伟晶岩的绿柱石矿物学特征及其指示意义 [J]. *岩石学报*, 2019, 35(7): 1999 - 2012.
Zhou Qifeng, Qin Kezhang, Tang Dongmei, et al. Mineralogical Characteristics and Significance of Beryl from the Rare-Element Pegmatites in the Lushi County, East Qinling, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(7): 1999 - 2012.
- [24] Uher P, Chudík P, Bačič P, et al. Beryl Composition and Evolution Trends; An Example from Granitic Pegmatites of the Beryl-Columbite Subtype, Western Carpathians, Slovakia [J]. *Journal of Geosciences*, 2010, 55: 69 - 80.
- [25] 李乐广, 王连训, 田洋, 等. 华南幕阜山花岗伟晶岩的矿物化学特征及指示意义 [J]. *地球科学*, 2019, 44(7): 2532 - 2550.
Li Leguang, Wang Lianxun, Tian Yang, et al. Petrogenesis and Rare-Metal Mineralization of the Mufushan Granitic Pegmatite, South China: Insights from in Situ Mineral Analysis [J]. *Earth Science*, 2019, 44(7): 2532 - 2550.
- [26] Zhou Q F, Qin K Z, Tang D M, et al. Mineralogy of the Koktokay No. 3 Pegmatite, Altai, NW China: Implications for Evolution and Melt-Fluid Processes of Rare-Metal Pegmatites [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2015, 27: 433 - 457.
- [27] 秦锦华, 王成辉, 陈毓川, 等. 南岭中段一六矿床绿柱石和白云母矿物学特征及其地质意义 [J]. *矿床地质*, 2022, 41(5): 1025 - 1041.
Qin Jinhua, Wang Chenghui, Chen Yuchuan, et al. Mineralogical Characteristics and Geological Significance of Beryl and Muscovite from Yiliu Deposit in Middle of Nanling Metallogenic Belt [J]. *Mineral Deposits*, 2022, 41(5): 1025 - 1041.
- [28] 王汝成, 谢磊, 诸泽颖, 等. 云母: 花岗岩伟晶岩稀有金属成矿作用的重要标志矿物 [J]. *岩石学报*, 2019, 35(1): 69 - 75.
Wang Rucheng, Xie Lei, Zhu Zeying, et al. Micas: Important Indicators of Granite-Pegmatite-Related Rare-Metal Mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(1): 69 - 75.
- [29] 邹天人, 徐建国. 论花岗伟晶岩的成因和类型的划分 [J]. *地球化学*, 1975, 4(3): 161 - 174.
Zou Tianren, Xu Jianguo. On the Origin and Classification of Granite Pegmatites [J]. *Geochimica*, 1975, 4(3): 161 - 174.
- [30] Foord E E, Černý P, Jackson L L, et al. Mineralogical and Geochemical Evolution of Micas from Mirolitic Pegmatites of the Anorogenic Pikes Peak Batholith, Colorado [J]. *Mineralogical Petrology*, 1995, 55: 1 - 26.
- [31] Vieira R, Roda-Robles E, Pesquera A, et al. Chemical Variation and Significance of Micas from the Fregeneda-Almendra Pegmatitic Field (Central-Iberian Zone, Spain and Portugal) [J]. *American Mineralogist*, 2011, 96: 637 - 645.
- [32] Kaeter D, Barros R, Menuge J F, et al. The Magmatic-Hydrothermal Transition in Rare-Element Pegmatites from Southeast Ireland: LA - ICP - MS Chemical Mapping of Muscovite and Columbite-Tantalite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 240: 98 - 130.
- [33] Roda E, Keller P, Pesquera A, et al. Micas of the Muscovite-Lepidolite Series from Karibib Pegmatites, Namibia [J]. *Mineralogical Magazine*, 2007, 71: 41 -

- 62.
- [34] Kile D E, Foord E E. Micas from the Pikes Peak Batholith and Its Cogenetic Granitic Pegmatites, Colorado: Optical Properties, Composition, and Correlation with Pegmatite Evolution [J]. *The Canadian Mineralogist*, 1998, 36: 463 - 482.
- [35] 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(1/2/3/4): 1 - 30.
- [36] 周起凤, 秦克章, 唐冬梅, 等. 阿尔泰可可托海3号脉伟晶岩型稀有金属矿床云母和长石的矿物学研究及意义 [J]. *岩石学报*, 2013, 29(9): 3004 - 3022.
Zhou Qifeng, Qin Kezhang, Tang Dongmei, et al. Mineralogy and Significance of Micas and Feldspars from the Koktokay No. 3 Pegmatitic Rare-Element Deposit, Altai [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(9): 3004 - 3022.
- [37] 周威, 谢磊, 王汝成, 等. 喜马拉雅吉隆淡色花岗岩—伟晶岩中云母的矿物学研究: 对锂富集过程的指示 [J]. *岩石学报*, 2022, 38(7): 2153 - 2173.
Zhou Wei, Xie Lei, Wang Rucheng, et al. The Study on the Micas in the Gyirong Leucogranite-Pegmatite from Himalaya: Implications for the Lithium Enrichment [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(7): 2153 - 2173.
- [38] 陶湘媛, 谢磊, 王汝成, 等. 绿柱石的矿物学特征: 以喜马拉雅错那和珠峰地区绿柱石为例 [J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2020, 56(6): 815 - 829.
Tao Xiangyuan, Xie Lei, Wang Rucheng, et al. Mineralogical Characteristics of Beryl: A Case Study of the Beryls from Cuona and Qomolangma District in Himalaya [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2020, 56(6): 815 - 829.
- [39] Černý P, Meintzer R E, Anderson A J. Extreme Fractionation in Rare-Element Granitic Pegmatites: Selected Examples of Data and Mechanisms [J]. *The Canadian Mineralogist*, 1985, 23(3): 381 - 421.
- [40] Chernoff C B, Carlson W D. Trace Element Zoning as a Record of Chemical Disequilibrium During Garnet Growth [J]. *Geology*, 1999, 27(6): 555 - 558.
- [41] Feenstra A, Engi M. An Experimental Study of the Fe - Mn Exchange Between Garnet and Ilmenite [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1998, 131(4): 379 - 392.
- [42] London D, Evensen J M, Fritz E A, et al. Enrichment and Accommodation of Manganese in Granite-Pegmatite Systems [C] // 11th Annual Goldschmidt Conference Abstract 3369, Lunar Planetary Institute Contribution 1088. Houston: Lunar Planetary Institute, 2001: 3369.
- [43] Srbu S, Buzgar N, Kasper H U. Geochemistry of Selected Garnets in Pegmatites from Rzoare Formation (Preluca Mountains, Romania) [R]. Cuza IASI: Analele Stiintifice Ale Universitatii, 2010.
- [44] Menard T, Spear F S. Metamorphism of Calcic Pelitic Schists, Strafford Dome, Vermont: Compositional Zoning and Reaction History [J]. *Journal of Petrology*, 1993, 34(5): 977 - 1005.
- [45] 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.
Lü 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.
- [46] London D. Pegmatites [M]. Québec: Canada Mineral, 2008: 1 - 347.
- [47] Baldwin J R. Compositional Range of Mn - Garnet in Zoned Granitic Pegmatites [J]. *The Canadian Mineralogist*, 1983, 21(4): 683 - 688.
- [48] Černý P, Hawthorne F C. Selected Peraluminous Minerals [C] // Černý P. Granitic Pegmatites in Science and Industry. Winnipeg: Mineral Association Canada, 1982: 63 - 98.
- [49] Frigstad O F. Amazonitpegmatitter I Iveland-Evje [J]. *Bergverksmuseets Skrift*, 1999, 15: 60 - 73.
- [50] Bogoch R, Bourne J, Shirav M, et al. Petrochemistry of a Late Precambrian Garnetiferous Granite, Pegmatite and Aplite, Southern Israel [J]. *Mineralogical Magazine*, 1997, 61(1): 111 - 122.
- [51] 张爱铨, 王汝成, 胡欢, 等. 阿尔泰可可托海3号伟晶岩脉中铌铁族矿物环带构造及其岩石学意义 [J]. *地质学报*, 2004, 78(2): 181 - 189.
Zhang Aicheng, Wang Rucheng, Hu Huan, et al. The Complex Zonation of Columbite-Group Minerals from the Koktokay No. 3 Granitic Pegmatite Dyke, Altai, NW China and Its Petrological Implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(2): 181 - 189.