

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.01.004

新疆哈密新发现的铷矿床成因:来自矿床地质和地球化学的证据

刘延兵^{1,2,3}, 文美兰^{1,3*}, 吴彦彬^{1,3}, 赵辰^{1,3}, 郑超杰^{1,3}LIU Yanbing^{1,2,3}, WEN Meilan^{1,3*}, WU Yanbin^{1,3}, ZHAO Chen^{1,3}, ZHENG Chaojie^{1,3}

1. 桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林 541004;

2. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 734000;

3. 桂林理工大学隐伏矿床预测研究所, 广西 桂林 541004

1. School of Geoscience, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;

2. Gansu Provincial Geological Survey Institute, Lanzhou 734000, Gansu, China;

3. Forecasting Institute of Concealed Deposits, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China

摘要:新疆哈密新发现的张宝山铷矿床是近年东天山地区典型的超大型稀有金属矿床。为研究花岗岩成矿作用、指导东天山地区稀有金属找矿工作,在详实的野外地质调查的基础上,开展了岩相学、矿物学和岩石地球化学研究,揭示矿床成因。地球化学研究表明,岩体高硅、富碱,且 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ 、高F(>2%)、高Rb, $\sum \text{REE}$ 含量介于 21.4×10^{-6} ~ 190.4×10^{-6} 之间,具强烈的负Eu异常特征。稀土元素配分模式具“M”型四分组效应。微量元素以富含Li、Rb、Cs、W、Sn、Nb、Hf、Th、Ga等稀有、分散元素为特征,为稀有金属矿化提供了物质基础。岩浆演化不同相带中F含量高,且寄主于云母中,F与稀有金属元素形成络合物迁移到岩体中。电子探针分析表明,铷主要以类质同象赋存在造岩矿物钾长石及白云母中,且矿脉中Rb的品位与这2种矿物含量呈正比,含铷岩体先后侵入淡色花岗岩、含天河石花岗岩、天河石花岗岩、含黄玉天河石花岗岩、黄玉钠长石花岗岩、含天河石花岗岩伟晶岩脉。越演化到晚期,Rb品位越高。综合分析认为,张宝山铷矿经历了多阶段的演化过程,属岩浆结晶分异和交代成因,类型属岩浆-热液型矿床,形成时代为印支晚期。

关键词:稀有金属矿床;矿床地质特征;地球化学;矿床成因;新疆哈密;矿产勘查工程

中图分类号:P618.77;P595 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)01-0041-14

Liu Y B, Wen M L, Wu Y B, Zhao C, Zheng C J. Genesis of the newly discovered rubidium deposit in Hami, Xinjiang: evidence from deposit geology and geochemistry. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(1): 41-54

Abstract: The newly discovered Zhangbaoshan rubidium deposit, located in Hami, Xinjiang, is a typical super-large, rare metal deposit in the East Tianshan area. Based on geological field surveys, mineralogy petrology, and geochemistry studies were conducted to study the granite mineralization and guide the prospecting of rare metals in this region to reveal the ore genesis. Research around the geochemical analysis of major and trace elements, rare earth elements (REE) shows that the petrochemical composition of rock mass was characterized by high silicon, alkali rich, $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, high F (>2%), high Rb, and $\sum \text{REE}$ contents ranging from 21.4×10^{-6} to 190.4×10^{-6} , with strong negative Eu anomaly. The distribution pattern of lanthanon has an "M" type REE tetrad effect. The trace elements are characterized by rich rare and scattered elements such as Li, Rb, Cs, W, Sn, Nb, Hf, Th, and Ga, which provide a material basis for rare metal mineralization. Element F, hosted in mica, has a high content in different phase bands of the magmatic evolution stage. F and rare

收稿日期:2021-01-14;修订日期:2021-03-30

资助项目:新疆维吾尔自治区国土资源厅《新疆哈密市张宝山铷多金属矿普查》(编号:T12-3-XJ14)和中国地质调查局项目《中国矿产地质与成矿规律综合集成和服务(矿产地质志)》(编号:DD20160346)

作者简介:刘延兵(1988-),男,在读硕士生,工程师,从事勘查地球化学和矿产勘查研究。E-mail:894966674@qq.com

*通信作者:文美兰(1974-),女,研究员,从事地球化学、地球电化学勘查、矿床学研究。E-mail:327271443@qq.com

metal elements form a series of complex compounds, which will migrate to the rock mass. Electron probe analysis indicates that element Rb presents isomorphism in the rock-forming minerals potassium feldspar and muscovite. The concentration of Rb in the veins is positively connected with the amount of potassium feldspar and muscovite. The rubidium-bearing rock body successively invaded the light granite, amazonite-bearing granite, amazonite granite, topaz-bearing amazonite granite, topaz albite granite, and amazonite-bearing granite pegmatite veins. The comprehensive analysis argues that the Zhangbaoshan rubidium deposit experienced multi-stage evolution and belongs to the magmatic crystallization and differentiation along with the metasomatism genesis. The deposit type is a magmatic-hydrothermal deposit, whose formation era is in the late Indosinian period.

Key words: rare metal deposits; geological characteristics of ore deposits; geochemistry; genesis of Rb deposits; Hami, Xinjiang; mineral exploration engineering

铷是重要的稀有金属和战略性新兴产业矿产,主要应用于军工部门和科学研究相关领域,是国家重要的战略性储备资源,特别是在导弹火箭、核武器、电子技术、航空航天、原子能等诸多领域得到广泛应用和研究(贾志磊,2016;文春华等,2017;孙艳等,2019)。铷具有优异的导电性(Norton, 1973; Simmons, 1998),被称为“长眼睛”的金属(李婧萍等,2005),是制造光电管、光电池的绝佳材料。由于能源日趋紧张,在新的能量转换领域,铷显示出光明的前景,引起世界能源界的注目。铷与钾因地球化学性质相近,参与到钾矿物的晶格中,一般含在云母与长石中,铷在自然界中的矿物稀少,但依然存在一些独立矿物(赵振华等,2020)。目前,中国的铷矿成矿类型有花岗岩型、花岗伟晶岩型、岩浆热液型、盐湖型(王瑞江等,2015)。铷常与锂、钽、铯等组合在一起,形成多矿种的稀有金属矿床。中国最重要的稀有金属矿床类型是碱性岩型、花岗岩型和花岗伟晶岩型三大类(李顺庭等,2011)。花岗伟晶岩型稀有金属矿床主要形成于华力西期—印支期,大多数分布在造山带内(袁忠信等,2001)。稀有金属矿成因目前主要有岩浆结晶分异说、岩浆期后热液交代说和混合成因说3种。无论是碱性岩型、花岗岩型还是花岗伟晶岩型稀有金属矿床,其成矿过程都与高度分异演化的岩浆活动相关,成矿过程都较复杂,不是一期或者一个阶段的成矿作用所能成就的(赵振华等,1992;毛景文等,2007;李胜虎,2015;杨兴武等,2017)。

新疆哈密发现的铷矿是甘肃省地质调查院近年来在东天山地区新发现的超大型矿床,为一处花岗岩型铷稀有金属矿床。矿体赋存在张宝山岩体顶部的天河石花岗岩中,前人对其母岩张宝山花岗岩开展了年代学、岩石地球化学研究(顾连兴等,1994;2003;刘四海等,2008)。而关于张宝山花岗岩

演化与铷矿成矿作用的关系研究较少。因此,笔者开展矿床地质学、岩相学、岩石地球化学、矿物地球化学方面的研究,总结矿化富集规律,并探讨矿床成因,为今后找矿工作提供依据,并指导区域上找寻同类矿床。

1 地质背景

研究区位于塔里木板块北缘东段,中天山地块与北天山晚古生代岛弧带结合部位(杨兴武等,2017)沙泉子断裂南侧(图1-a)。沙泉子断裂横贯区内,以北为北天山觉罗塔格晚古生代岛弧带,以南为中天山地块。出露地层主要为长城纪星星峡岩群(ChX.)和石炭纪雅满苏组(C_1y),前者为古老的结晶基底岩系,后者为一套中—酸性海底火山岩及火山碎屑岩。构造主要表现为区域性断裂和褶皱构造。断裂构造可分为北西向、北东向和南北向3组,其中北东向断裂构成研究区的主体构造格架。区域上岩浆岩分布十分广泛,主要集中在2个时代:早期为石炭纪侵入岩,晚期为三叠纪侵入岩。其中,三叠纪侵入岩与铷等稀有矿产形成关系十分密切(图1-b)②。

2 含铷岩体地质特征

张宝山铷矿区侵入岩主要为中酸性侵入岩,主要包括石炭纪和三叠纪侵入岩,尤其是印支期白石头泉岩体(张宝山岩体)分布面积大,岩浆分异良好,为铷矿形成创造了有利条件。石炭纪侵入岩在矿区分布广泛,主要岩石类型有闪长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩,侵入于长城纪星星峡岩群(ChX.)和石炭纪雅满苏组(C_1y)中,为第四系(Q)覆盖,被三叠纪二长花岗岩、黄玉天河石花岗岩、天河石花岗岩侵入(图2)。

三叠纪侵入岩为矿区最主要的地质体,呈椭圆

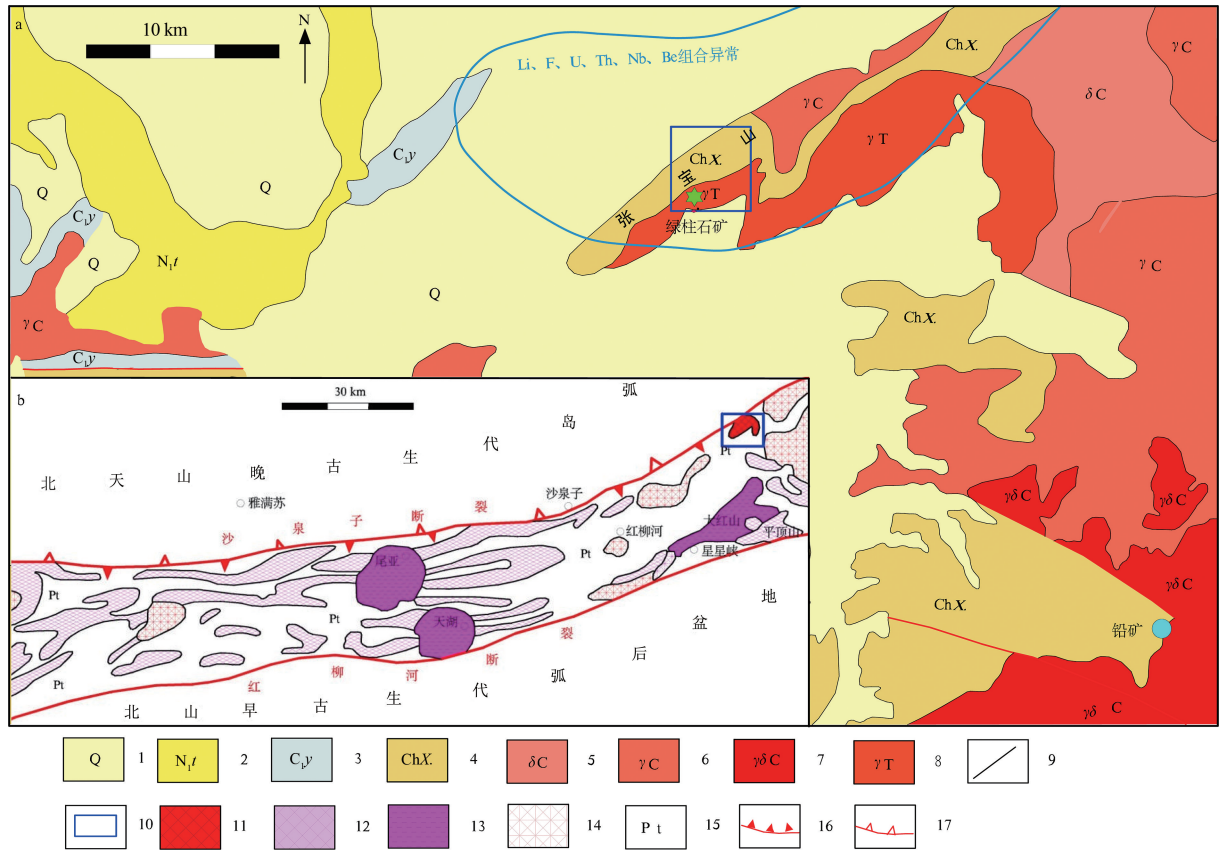


图 1 张宝山铷矿区域地质(a)和矿产图(b)(据顾连兴等,2003 和①修改)

Fig. 1 Regional geology(a) and mineral resources map(b) of Zhangbaoshan rubidium deposit

1—第四系;2—新近系桃园组;3—石炭系雅满苏组;4—长城纪星星峡岩群;5—石炭纪闪长岩、石英闪长岩;6—石炭纪浅灰色黑云母花岗岩;7—石炭纪花岗闪长岩;8—三叠纪灰白色白云母花岗岩;9—断层;10—研究区位置及范围;11—海西期花岗岩类;12—前海西期花岗岩类;13—印支期花岗岩类;14—未知年代的花岗岩类;15—中、新元古界;16—早古生代俯冲带;17—晚古生代俯冲带

形岩基产出,侵入于长城纪星星峡岩群和海西早期的闪长岩体、花岗闪长岩中,大部分为第四纪沉积物覆盖。岩体呈北东向展布的椭圆状,与围岩接触界线不规则,外接触带多以不规则岩脉呈树枝状侵入于围岩中,接触面总体产状以岩体为中心向四周倾斜,倾角一般为 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 。地表露头面积约 12 km^2 ,岩体总体面积约 50 km^2 ,从野外填图和钻孔资料看,张宝山含铷岩体为典型的Li-F花岗岩组合,与中国华南邓阜仙Li-F花岗岩体相似(孙承铨等,1983;张学渊,1989;刘四海等,2008),为多阶段侵入的岩体。岩体分异较好,相带清楚。根据接触关系、岩相特征,结合同位素年龄资料,将岩体由早到晚依次划分为6个期次:淡色花岗岩、含天河石花岗岩(图3-a)、天河石花岗岩(图3-b)、含黄玉天河石花岗岩(图3-c)、黄玉钠长石花岗岩和伟晶岩脉,显

示了岩石逐渐向富氟、富钠、富铷、铯演化的特点。

淡色花岗岩($\eta\gamma_5^{1a}$):分布于矿区中部,为张宝山岩体的主体组成部分,大部分被第四系覆盖,地表出露面积约 10 km^2 ,局部侵入石炭纪二长花岗岩、花岗闪长岩和闪长岩中,以及星星峡岩群中,与张宝山岩体含天河石花岗岩、天河石花岗岩呈渐变过渡接触。岩石呈灰白色,细粒花岗结构、块状构造。主要矿物成分为白云母($3\% \sim 5\%$)、石英($28\% \sim 35\%$)、钠长石($22\% \sim 36\%$)和钾长石($22\% \sim 35\%$),副矿物为石榴子石和萤石。石英为半自形晶,粒径 $1 \sim 2.5 \text{ mm}$;白云母手标本为绿色,显微镜下呈无色,其内常见黑云母的反应残留体;钾长石呈他形晶,粒径 $0.8 \sim 1.2 \text{ mm}$,钠长石呈 $0.5 \sim 1.5 \text{ mm}$ 的板条状半自形,聚片双晶清晰。从刻槽样及劈心样的分析结果显示, Rb_2O 含量介于 $0.08\% \sim$

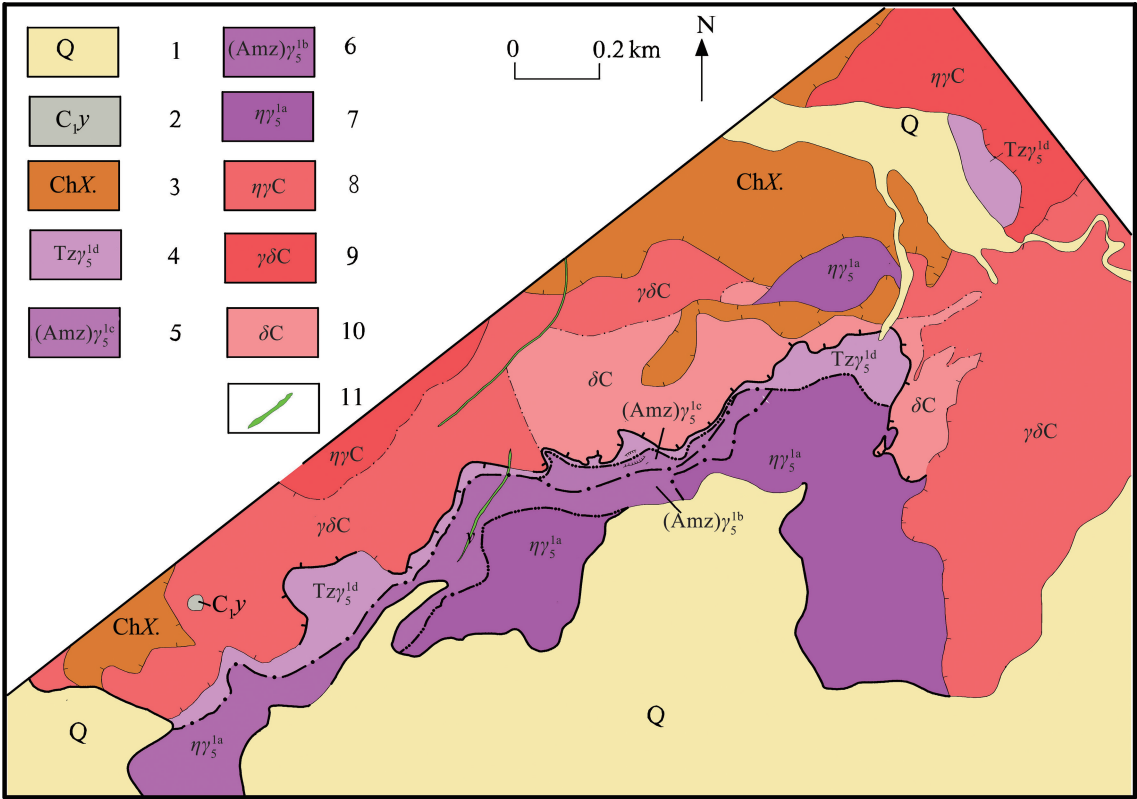


图 2 张宝山铷多金属矿区地质简图^①

Fig. 2 Geological sketch of Zhangbaoshan rubidium mine

1—第四系;2—石炭系雅满苏组;3—长城系星星峡群;4—含黄玉天河石花岗岩;5—天河石花岗岩;
6—含天河石花岗岩;7—浅色二长花岗岩;8—肉红色二长花岗岩;9—花岗闪长岩;10—闪长岩;11—辉绿岩脉

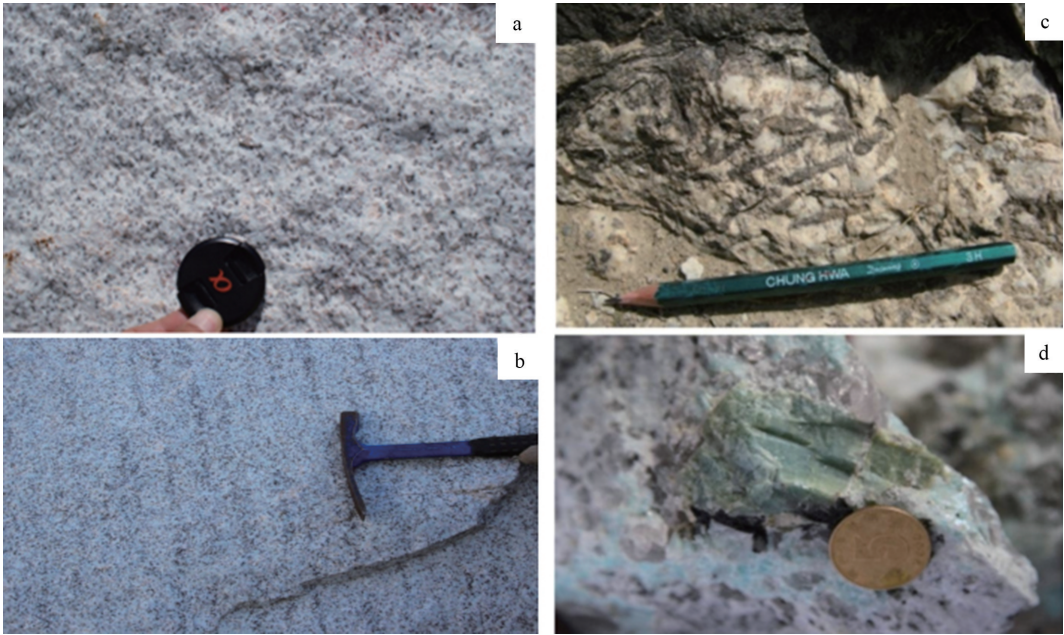


图 3 张宝山铷矿花岗岩体野外地质特征典型照片

Fig. 3 Field geological characteristics of granite in Zhangbaoshan rubidium ore

a—含天河石花岗岩;b—一条带状天河石花岗岩;c—岩体和围岩接触带黄玉平行接触面排列;d—天河石花岗岩伟晶岩脉中绿柱石晶体

0.15%之间,显示 Rb 元素由岩体下部至上部呈富集趋势。

含天河石花岗岩((Amz) γ_5^{1b}):分布局限,仅在张宝山一带出露,与淡色花岗岩和天河石花岗岩均呈渐变过渡接触。与淡色花岗岩的主要区别为出现少量蓝绿色天河石颗粒(1%~5%),白云母中的黑云母残留体少见;石英多呈自形晶,粒径向上渐增。 Rb_2O 含量一般在 0.06%~0.12%之间。

天河石花岗岩((Amz) γ_5^{1c}):浅蓝绿色,中细粒花岗结构、似斑状结构,块状构造,局部见条带状构造。主要矿物为石英、钾长石、斜长石。钾长石含量约为 40%(其中天河石含量约 10%),半自形粒状,多见格子双晶、卡氏双晶,其中少部分为具条纹结构的条纹长石,表面发育较强的粘土化、绢云母化。石英含量约为 35%,他形粒状,正低突起,具有典型的波状消光。斜长石含量约为 20%,半自形—他形板粒状,可见聚片双晶、卡钠双晶,发生绢云母化、略微黝帘石化与高岭石化。

含黄玉天河石花岗岩((Amz) γ_5^{1d}):主要矿物和结构特征与天河石花岗岩相似,不同之处是岩相中含有黄玉(约 2%)。黄玉均为长柱状自形晶,横断面大小为(1~3)mm×(3~5)mm,长 5~40 mm,多数为 20 mm 左右。其中缺乏其他造岩矿物的包裹体,因而是岩浆直接结晶的产物。绢云母常沿黄玉的边缘或解理交代,交代强烈者仅保留其假象。与天河石花岗岩相比,含黄玉的岩石中石英颗粒已明显加粗,粒径多为 3~5 mm。石英的六方柱和菱面体单形均较发育,其中常包裹有无定向排列的钠长石微晶,具有类雪球构造。

黄玉钠长花岗岩:产在岩体顶部与变质岩的接触带附近,厚度 10 cm~1 m,侵入石炭纪闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩中。岩石呈灰白色,具似斑状结构。斑晶为黄玉(10%~15%)和石英(10%~15%)。基质为白云母(10%~15%)、糖粒状钠长石(60%~70%)、黄玉(<5%)和钾长石(10%),其中天河石(约 5%)含少量石榴子石和萤石。黄玉手标本呈蜡黄色,强烈绢云母化者显黄绿色,晶体粒度为(3~5)mm×(5~30)mm,大致定向排列,排列方向与岩体和围岩的接触面斜交,这种定向可能代表岩浆流动方向,也表明黄玉是岩浆早期结晶作用的产物。石英粒径为 5~15 mm,最大者可达 20 mm,均为柱面发育的 α -石英,并发育亚颗粒结构,各种基

质矿物均呈团块状。

伟晶岩脉:主要为花岗伟晶岩,一般沿晚期天河石花岗岩中的原生节理贯入,分布无定向,脉岩一般宽 1~2 m,长 10~50 m,伟晶岩的矿物组成主要为天河石和石英、绿柱石(图 3-d),天河石中含铷 0.2%以上。

以上 6 期花岗岩(浅色花岗岩、含天河石花岗岩、天河石花岗岩、含黄玉天河石花岗岩、黄玉钠长花岗岩和伟晶岩脉)之间均呈脉动侵入接触,出露面积由大变小、岩石结构由粗变细特征,矿物组成由富钾长石至富钠长石转化,具有典型的 Li-F 花岗岩特征。值得一提的是,晚期侵入的天河石花岗岩含铷在 1000×10^{-6} 以上,具有全岩面状矿化现象,为最主要的含铷岩相,末期含天河石花岗伟晶岩脉含铷也在 1000×10^{-6} 以上,一般呈细脉状分布于天河石花岗岩中。由此可见,晚期天河石花岗岩和末期伟晶岩为主要含铷岩相。

研究区围岩蚀变主要表现为岩石具不同程度的褐铁矿化、钾化、云英岩化等,为张宝山含铷岩体岩浆演化后期,岩浆热液出溶后,对早期岩体或围岩产生的自蚀变现象,这种蚀变作用与铷矿的进一步富集关系密切。其中钾化、云英岩化对铷的形成起主导作用,且分布较普遍。

3 矿床地质特征

甘肃省地质调查院 2012 年对张宝山含铷岩体进行普查评价^①。通过地表槽探工程揭露和深部钻探工程控制,以 $Rb_2O\geq 0.1\%$ 为指标,圈出 1 个矿化带,8 条工业矿体(图 4),呈环带状沿岩体边部分布,由南向北由淡色花岗岩、含天河石花岗岩、天河石花岗岩、含黄玉天河石花岗岩及黄玉钠长花岗岩 5 个岩相带组成,总体走向 $50^\circ\sim 60^\circ$,长大于 5000 m,宽 300~1000 m,呈北东向大致平行分布,矿体呈“似层”状、透镜状产出(图 4、图 5),其中主要矿体为 Rb2-2、Rb2-3、Rb2-6、Rb2-7、Rb2-8、Rb2-9、Rb2-14、Rb2-8,矿体规模较大(表 1)。矿体走向与矿化带基本一致,矿体长 280~3600 m,平均厚度 2.46~23.04 m,延深 20~560 m, Rb_2O 平均品位 0.10%~0.15%。13~5 勘探线之间的矿体倾向北西,倾角平缓。

根据含铷岩性的不同,研究区含铷脉体主要有二长花岗岩、天河石花岗岩、天河石花岗伟晶岩 3 种

表 1 张宝山铷多金属矿主要矿体特征

Table 1 Main orebody characteristics of rubidium multimetallic ore in Zhangbaoshan

矿体编号	长度/m	平均厚度/m	斜深/m	平均品位(R_2O)/%	矿体产状	形态
Rb2-2	1280	6.60	80~230	0.13	$306^{\circ} \angle 11^{\circ}$	似层状
Rb2-3	1180	4.16	150~365	0.10	$306^{\circ} \angle 11^{\circ}$	似层状
Rb2-6	3600	11.46	70~560	0.11	$320^{\circ} \sim 347^{\circ} \angle 7^{\circ} \sim 36^{\circ}$	似层状
Rb2-7	1200	3.15	45~80	0.10	$310^{\circ} \angle 12^{\circ}$	似层状
Rb2-8	1200	13.68	95~370	0.10	$310^{\circ} \angle 23^{\circ}$	似层状
Rb2-9	1200	2.69	80~120	0.10	$310^{\circ} \angle 12^{\circ}$	似层状
Rb2-14	2600	23.04	60~400	0.10	$312^{\circ} \sim 340^{\circ} \angle 20^{\circ} \sim 35^{\circ}$	似层状
Rb2-18	2600	6.21	130~210	0.10	$315^{\circ} \sim 343^{\circ} \angle 16^{\circ} \sim 62^{\circ}$	似层状

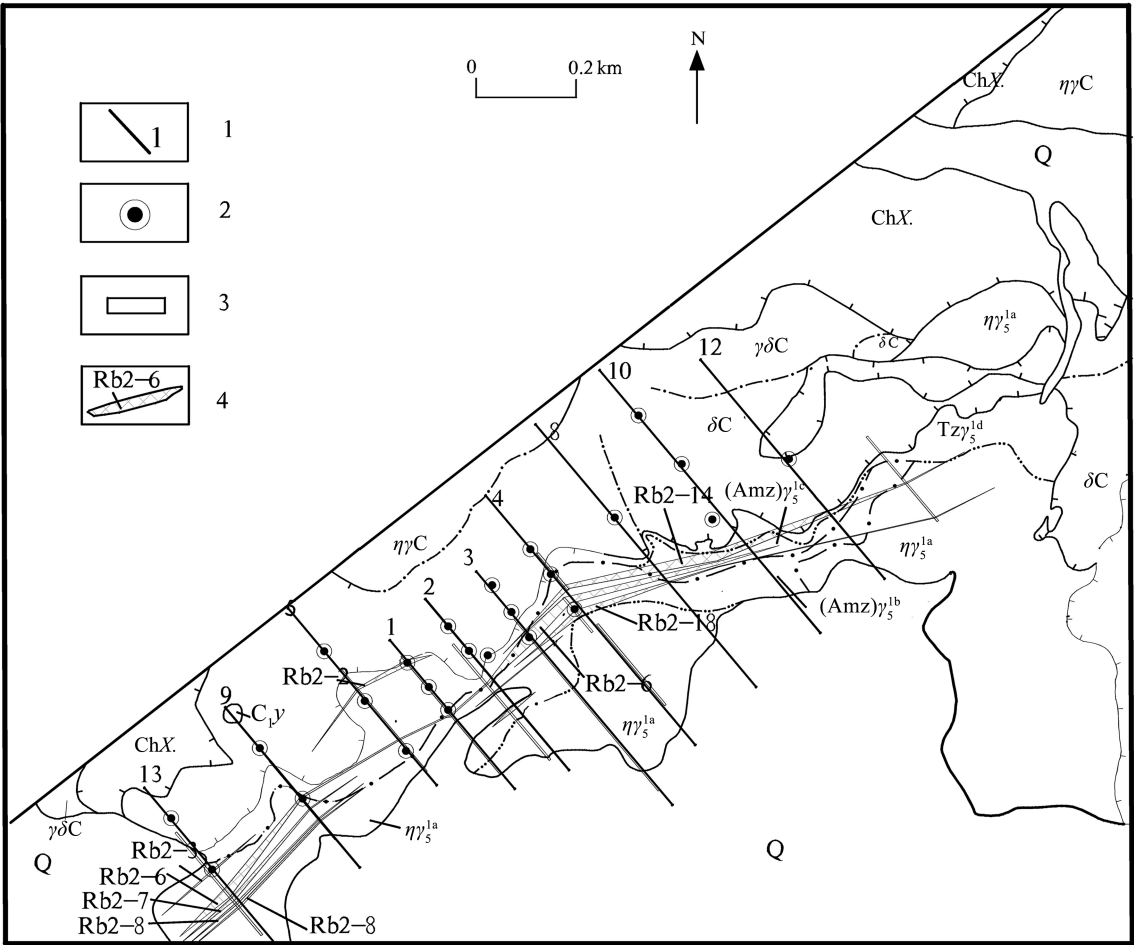


图 4 张宝山铷矿区矿体特征分布图

Fig. 4 Main orebody distribution map of Zhangbaoshan rubidium deposit

Q—第四系; $C_1\gamma$ —石炭系雅满苏组;ChX—长城系星峡群; Tz_5^{1d} —含黄玉天河石花岗岩; $(Amz)\gamma_5^{1c}$ —天河石花岗岩;
 $(Amz)\gamma_5^{1b}$ —含天河石花岗岩; $\eta\gamma_5^{1a}$ —浅色二长花岗岩; $\eta\gamma C$ —肉红色二长花岗岩; $\gamma\delta C$ —花岗闪长岩; δC —闪长岩;
1—勘探线及编号;2—钻孔位置及编号;3—探槽位置及编号;4—矿体及编号

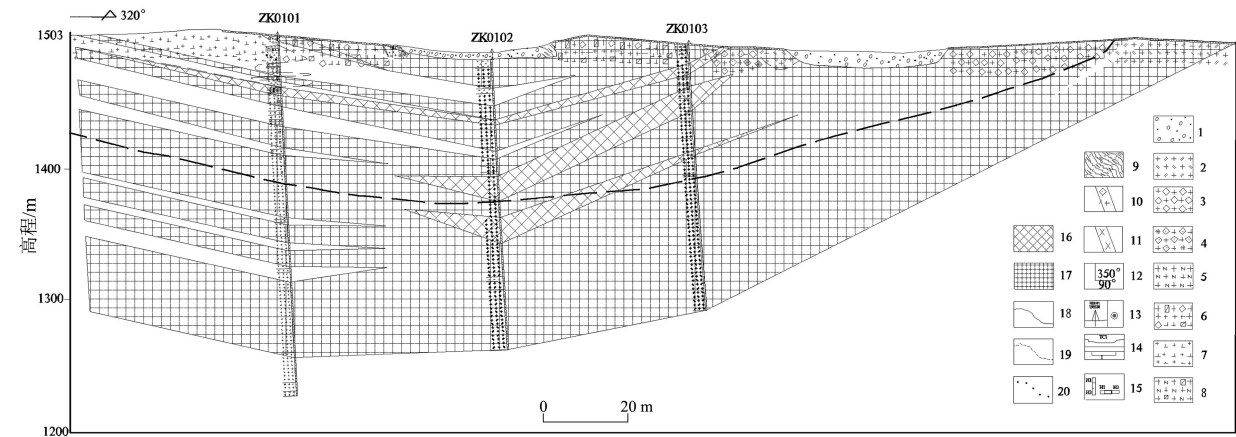


图 5 张宝山铷多金属矿区 01 勘探线剖面示意图^①

Fig. 5 Section diagram of 01 exploration line in rubidium polymetallic mining area of Zhangbaoshan

1—第四系;2—二长花岗岩;3—天河石花岗岩;4—云英岩化天河石花岗岩;5—钠长花岗岩;6—含黄玉天河石花岗岩;7—闪长岩;
8—含黄玉钠长花岗岩;9—白云石英片岩;10—天河石伟晶岩脉;11—辉长岩脉;12—产状;13—完工见矿钻孔及编号;14—完工探槽及编号;
15—取样位置及编号;16—工业矿体及编号;17—低品位矿体及编号;18—地质界线;19—推测地质界线;20—岩相界线

类型。由于铷矿尚未发现独立金属矿物,根据兰州有色冶金设计研究院有限公司国宝山铷矿工业指标推荐报告结果^②,边界品位(Rb_2O)为 0.06%,最低工业品位(Rb_2O)0.10%。通过能谱检测和单矿物分析^④,铷主要以类质同象的形式存在于钾长石中^{③④}(赖杨等, 2016; 王守敬等, 2017; 周玉等, 2018), Rb_2O 占 69.53%;30.47%的 Rb_2O 存在于白云矿物中;钠长石与黑云母矿物中未见铷(表 2)。结合选矿实验结果、矿石品位和赋矿围岩类型,将张宝山铷多金属矿矿石自然类型划分为 3 种类型:①二长花岗岩型, Rb_2O 为 0.06%~0.08%;②天河石花岗岩型, Rb_2O 为 0.06%~0.20%;③天河石花岗伟晶岩型, Rb_2O >0.1%。天河石花岗岩型为区内最主要的矿石类型,浅蓝绿色,中细粒花岗结构、似斑状结构,块状构造,局部见条带状构造。主要矿物为石英、钾长石、斜长石。钾长石含量约 40%(其中天河石含量约 10%),半自形粒状,多见格子双晶、卡氏

双晶,少部分为具条纹结构的条纹长石,表面发育较强的粘土化、绢云母化。石英含量约 35%,他形粒状,正低突起,无解理,具有典型的波状消光。斜长石含量约 20%,半自形—他形板粒状,可见聚片双晶、卡钠双晶,发生绢云母化、略黝帘石化与高岭石化。岩石中发育天河石伟晶岩包体,长约 2 m,宽约 50 cm,主要由天河石、石英和云母组成,其中天河石粒度可达 10 cm 以上。 Rb_2O 含量在 0.10%~0.20%之间(图版 I)。

4 矿床地球化学特征

4.1 样品采集与分析方法

为研究张宝山含铷花岗岩体及与稀有金属矿化的关系,采集代表性样品 17 件,其中淡色二长花岗岩样品 5 件,含天河石花岗岩样品 3 件,天河石花岗岩样品 3 件,含黄玉天河石花岗岩样品 2 件,黄玉钠长石花岗岩样品 2 件,含天河石伟晶岩样品 2 件,进行了主量、微量和稀土元素地球化学分析。

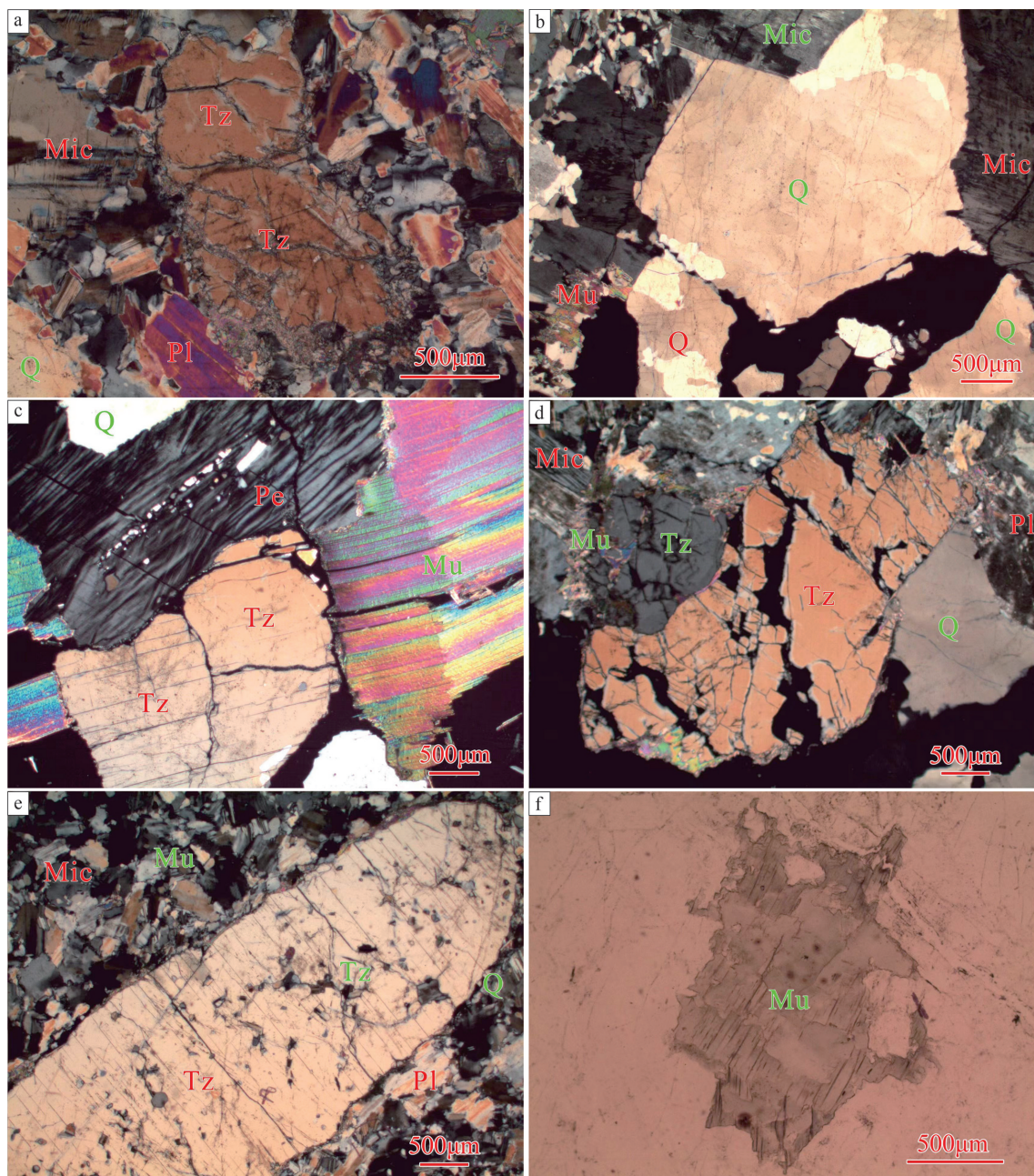
所有样品的测试分析均在自然资源部武汉矿产资源监督检测中心完成。岩石样品经磨碎溶样处理后,采用熔融法制样 X 射线荧光光谱法分析主量元素,仪器型号为 PW2440 型光谱仪,利用酸溶法配制样品溶液,采用电感耦合等离子体质谱法分析微量和稀土元素,分析精度优于 10%。

表 2 矿石能谱检测和单矿物分析结果^④

Table 2 Ore energy spectrum detection and single mineral analysis results table

矿物名称	矿物含量/%	$\text{Rb}_2\text{O}/\%$	金属量/%
钠长石	41.02	0	0
正长石	22.91	0.35	69.53
白云母	4.98	0.71	30.47
黑云母	0.034	0	0

图版 I Plate I



a.斑状中细粒含黄玉天河石花岗岩中黄玉斑晶呈短柱状,无色,中正突起,斜长石具卡式和聚片双晶;b.斑状中细粒含天河石花岗岩石英斑晶内亚颗粒发育良好,形成镶嵌结构;c.含黄玉天河石花岗岩伟晶岩中微量黄玉出现,为长柱状、柱粒状;d.天河石花岗岩;e.黄玉斑晶呈短柱状,无色,中正突起,一组解理完全;f.中细粒含天河石花岗岩中白云母为较自形的鳞片状集合体。
Mic—微斜长石;Mu—白云母;Pl—斜长石;Q—石英;Tz—黄玉;Pe—条纹长石

4.2 分析结果

张宝山岩体主量和微量元素含量见表3,稀土元素含量见表4。从表3可以看出,张宝山岩体岩石以高硅($\text{SiO}_2 = 66.8\% \sim 77.3\%$)、高碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 8.28\% \sim 13.25\%$)为特征,为弱过铝质($A/\text{NCK} = 0.98 \sim 1.11$), TiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 含量低。

P_2O_5 含量极低,可与富F花岗岩相对比。岩体中 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, 岩石富钠质。从淡色二长花岗岩→含天河石花岗岩→天河石花岗岩→含黄玉天河石花岗岩→黄玉钠长石花岗岩,岩石化学成分变化总的趋势是 Al_2O_3 和 Na_2O 含量增加, SiO_2 和镁铁组分($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO} + \text{MnO}$)减少。

表 3 张宝山铷多金属矿不同岩相花岗岩主量和微量元素含量
Table 3 Content of major and trace elements in granite of different stages in Zhangbaoshan rubidium polymetal

岩性	淡色花岗岩				含天河石花岗岩				天河石花岗岩				含黄玉天河石花岗岩				黄玉钠长石花岗岩				伟晶岩
样号	D307QY	D2213QY	TC3QY	Qy-2	Qy-6	Qy-7	TC3QY	PM07QY	Qy-8	TC3QY	PM07QY	PM07QY	TC4QY	Qy-10	ZBSQK	ZBSQK	Qy-10	ZBSQK	ZBSQK	ZBSQK	ZBSQK
	-1	-1	-3				-2	-3		-1	-2	-2	-1		-7	-8		-7	-8	-8	-8
SiO ₂	76.9	73.4	75.7	74.0	76.3	73.6	76.6	77.3	76.6	77.1	73.9	73.6	74.2	66.8	70.04	73.92	66.8	70.04	73.92	73.92	73.92
Al ₂ O ₃	12.9	14.4	13.0	14.5	12.7	15.0	12.8	12.3	12.5	13.4	14.5	15.0	15.3	18.4	15.85	14.61	18.4	15.85	14.61	14.61	14.61
Fe ₂ O ₃	0.03	0.45	0.45	0.56	0.35	0.10	0.08	0.14	0.23	0.02	0.19	0.24	0.13	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
FeO	0.66	0.45	0.47	0.04	0.47	0.29	0.56	0.58	0.36	0.44	0.38	0.06	0.14	0.10	0.07	0.50	0.07	0.50	0.50	0.50	0.50
CaO	0.42	1.53	0.55	1.16	0.58	0.32	0.36	0.46	0.19	0.20	0.40	0.71	0.38	0.81	0.33	0.26	0.81	0.33	0.26	0.26	0.26
MgO	0.05	0.23	0.07	0.19	0.09	0.03	0.04	0.05	0.05	0.02	0.04	0.03	0.04	0.06	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01
K ₂ O	3.81	4.06	4.34	4.54	4.28	4.78	4.40	4.02	7.00	4.54	4.70	3.52	3.71	6.63	4.93	4.41	6.63	4.93	4.41	4.41	4.41
Na ₂ O	4.81	4.24	4.68	3.89	4.48	5.55	4.51	4.42	2.68	3.74	5.26	6.18	5.52	6.62	5.18	5.11	6.62	5.18	5.11	5.11	5.11
TiO ₂	0.01	0.09	0.04	0.05	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.04	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01
P ₂ O ₅	0.01	0.05	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
MnO	0.17	0.04	0.05	0.04	0.09	0.13	0.13	0.15	0.10	0.14	0.13	0.09	0.12	0.02	0.18	0.11	0.12	0.02	0.18	0.11	0.11
烧失量	0.12	0.98	0.53	0.92	0.54	0.23	0.38	0.38	0.17	0.29	0.40	0.55	0.36	0.44	0.53	0.28	0.36	0.44	0.53	0.28	0.28
H ₂ O ⁺	0.33	0.55	0.69	0.71	0.51	0.17	0.38	0.36	0.21	0.41	0.48	0.34	0.29	0.50	1.1	1.06	0.29	0.50	1.1	1.06	1.06
H ₂ O ⁻	0.15	0.10	0.24	0.14	0.16	0.09	0.13	0.12	0.07	0.14	0.08	0.09	0.07	0.12	3.52	3.32	0.07	0.12	3.52	3.32	3.32
F	20.41	20.40	25.70	16.10	23.10	15.40	21.40	21.00	10.60	13.90	22.30	24.90	58.60	29.80	96.57	96.34	58.60	29.80	96.57	96.34	96.34
Cr	232	2.12	293	93.6	227	2.18	238	267	161	1.53	159	2.08	1.47	3.42	65.28	65.55	1.47	3.42	65.28	65.55	65.55
Ni	5.05	1.71	4.80	30.6	3.35	1.66	11.8	3.48	3.19	2.48	4.67	1.78	2.11	1.18	4.17	4.7	2.11	1.18	4.17	4.7	4.7
Co	1.51	18.9	1.55	23.3	1.60	17.6	1.64	1.61	1.51	25.0	1.5	22.7	19.2	24.4	132	93	19.2	24.4	132	93	93
Li	3.47	23.5	80.3	60.1	77.1	103	140	114	144	195	172	145	171	59.0	0.84	0.36	59.0	23.4	0.84	0.36	0.36
Rb	527	294	569	260	560	983	742	598	1450	780	945	738	818	1090	0.7	0.49	818	1090	0.7	0.49	0.49
Cs	7.96	10.3	24.4	16.2	26.3	40.8	29.0	21.4	43.5	37.7	32.3	22.4	26.4	22.0	262	316	26.4	22.0	262	316	316
W	1.59	316	3.52	337	5.93	308	3.40	5.9	3.29	361	3.89	345	338	110	1474	1278	338	110	1474	1278	1278
Sr	8.17	148	4.50	96.7	3.97	0.67	1.22	0.94	2.61	0.82	0.77	0.72	1.63	28.8	23.9	36	1.63	28.8	23.9	36	36
Ba	3.47	541	13.7	361	4.51	1.72	1.6	1.52	4.94	8.07	1.68	1.62	6.37	98.8	3.87	2.76	6.37	98.8	3.87	2.76	2.76
V	13.6	3.31	20.1	0.05	13.7	0.05	11.0	13.5	12.1	2.26	5.51	0.05	0.05	0.05	8.8	5.66	0.05	0.05	8.8	5.66	5.66
Sc	7.64	7.39	6.25	7.65	7.04	8.52	6.48	7.55	6.06	6.00	8.54	8.44	10.4	7.97	9.21	8.94	10.4	7.97	9.21	8.94	8.94
Nb	16.4	11.1	41.5	14.0	46.8	18.8	21.2	18.2	34.2	17.2	24.5	79.1	38.3	33.0	54.5	37.5	38.3	33.0	54.5	37.5	37.5
Ta	6.33	2.21	6.73	2.89	6.68	9.62	5.88	5.22	8.5	4.53	5.94	15.8	8.03	7.90	15.6	15.6	8.03	7.90	15.6	15.6	15.6
Zr	68.0	67.9	72.2	36.9	85.5	54.2	62.1	70.4	24.5	63.4	53.9	62.4	49.9	28.4	42.7	35.4	49.9	28.4	42.7	35.4	35.4
Hf	14.7	3.57	9.59	2.15	11.6	14.7	13.0	13.7	7.01	13.5	14.9	17.5	15.5	10.3	11.6	7.39	15.5	10.3	11.6	7.39	7.39
Be	6.14	7.3	7.41	8.37	9.2	10.9	8.58	6.31	10.4	6.99	8.21	10.2	7.85	8.10	5.92	7	7.85	8.10	5.92	7	7
Ga	26.1	29.9	25.7	28.2	26.6	34.9	28.0	26.2	27.7	28.3	34.7	39.1	36.4	43.5	35.1	30.4	36.4	43.5	35.1	30.4	30.4
Sn	28.6	7.41	20.4	13.9	18.8	48.2	50.0	26.3	46.7	47.6	56.6	54.2	50.2	15.3	42.2	32.9	50.2	15.3	42.2	32.9	32.9
U	5.70	2.25	4.05	2.45	6.00	1.86	2.36	6.80	1.55	2.33	2.74	3.45	2.50	0.77	1.4	0.78	2.50	0.77	1.4	0.78	0.78
Th	9.41	9.26	9.86	7.84	16.4	4.38	8.94	7.68	4.32	4.43	5.16	5.95	3.85	3.6	3.86	2.78	3.85	3.6	3.86	2.78	2.78

注:主量元素含量单位为%,微量元素含量单位为 10⁻⁶

表 4 张宝山铷多金属矿不同岩相花岗岩稀土元素含量
Table 4 Contents of rare earth elements in granite at different stages in Zhangbaoshan rubidium polymetallic deposit

样号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE (La/Yb) _n	δEu
10 ⁻⁶																		
D307QY-1	淡色花岗岩	4.36	14.1	2.25	12.4	8.85	0.03	11.3	3.16	24.6	5.42	16.1	2.91	20.5	2.78	149	128.8	0.15
D2213QY-1		8.91	25.4	3.83	18.1	10.2	0.12	9.15	2.66	19	3.52	9.82	1.85	13	1.56	54.8	127.1	0.49
TC3QY-3		6.34	21.4	3.68	20	13.7	0.01	16.2	4.57	35.2	7.49	22.4	4.26	31	4.18	186	190.4	0.15
Qy-2		5.13	22.8	3.66	17.8	11.3	0.01	8.63	2.73	19.1	3.22	8.68	1.68	11.9	1.34	37.1	118.0	0.31
Qy-6		5.82	20.4	3.66	17.6	10.9	0.01	8.58	2.56	17.8	3.1	8.29	1.55	11	1.25	38.6	112.5	0.38
Qy-7		4.06	16.8	2.34	9.59	5.69	0.03	4.04	1.32	9.35	1.52	4.09	0.77	5.48	0.62	17.1	65.7	0.53
TC3QY-2	含天河石 花岗岩	5.89	21.8	3.7	18.7	12.4	0.00	11.2	3.42	25.2	4.52	12.2	2.28	15.9	1.87	64.9	139.1	0.27
PM07QY-3		6.86	24.5	4.36	21.7	13.9	0.00	12.5	3.63	25.9	4.74	13.1	2.47	17.5	2.07	69.4	153.2	0.28
Qy-8	天河石花岗岩	3.1	10.8	1.75	8.56	6.29	0.00	5.69	2.01	15.9	2.95	8.66	1.74	12.9	1.51	27.7	81.9	0.17
TC3QY-1		2.9	9.75	1.7	8.01	5.28	0.01	4.25	1.5	12.4	2.38	7.28	1.56	11.9	1.42	23.2	70.3	0.17
ZBSQK-4		6.64	23.2	4.06	20.4	13.1	0.01	11.1	3.23	21.7	3.47	8.33	1.37	8.9	0.97	45.9	126.5	0.54
PM07QY-2		4.28	14.8	2.14	7.78	3.9	0.03	2.54	0.77	5.23	0.84	2.26	0.44	3.2	0.34	8.18	48.6	0.96
PM07QY-1	含黄玉天河 石花岗岩	3.19	12.1	1.91	8.03	4.74	0.01	3.44	1.12	8	1.31	3.51	0.67	4.7	0.53	13.7	53.3	0.49
Qy-9		3.83	12.9	2.19	10.3	6.53	0.02	5.38	1.85	14.4	2.67	7.67	1.52	11.4	1.33	26.9	82.0	0.24
Qy-10		1.96	5.34	0.74	2.88	1.61	0.07	1.22	0.4	2.98	0.52	1.37	0.26	1.8	0.22	5.7	21.2	0.78
ZBSQK-7	伟晶岩	5.92	22.7	3.73	17.2	10.5	0.00	8.43	2.59	18.2	3.1	8.06	1.44	9.93	1.1	40.6	112.9	0.43
ZBSQK-8		2.69	10.4	1.78	8.54	5.71	0.00	5.02	1.62	11.7	2.06	5.44	1	6.99	0.79	28.9	63.7	0.28

从表 4 可以看出,岩体稀土元素总量较低, ΣREE 含量介于 $21.4 \times 10^{-6} \sim 190.4 \times 10^{-6}$ 之间, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值(0.15~0.96)较低,强烈亏损 Eu ($\delta \text{Eu} = 0.001 \sim 0.14$)。球粒陨石标准化稀土元素配分模式图呈明显的“海鸥”型(图 6-a),且其左翼低,右翼高,重稀土元素富集,可能与岩石中石榴子石和锆石作为主要副矿物存在有关, Eu 具明显的负异常,表明在源区部分熔融或原始岩浆分离结晶过程中,有大量斜长石参与了矿物-熔体平衡(Taylor et al., 1995)。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 6-b)中,张宝山岩体明显富集 Li、Rb、Cs、W、Sn、Nb、Hf、Th、Ga 等稀有、稀散元素,而 Sr、Ba、Co、Ni、V 和 Cu 含量低。从淡色花岗岩→含天河石花岗岩→天河石花岗岩→含黄玉天河石花岗岩→黄玉钠长石花岗岩,亲铁元素 Co、Ni 和 Cr,以及高场强元素 W、Nb、Zr、U、Th 和 Y 总体呈下降趋势,而大离子亲石元素 Li、Rb、Ga、V、Sn 含量总体呈增高趋势,但 Li 和 Rb 含量在黄玉钠长石花岗岩中又有所降低。

5 讨 论

5.1 成矿时代

为了准确研究张宝山含铷岩体的成岩年龄,进一步探讨铷矿的成矿年龄,通过文献查阅、综合对比分析,对张宝山成岩成矿时代进行讨论。张宝山含铷岩体侵入于长城纪星星峡岩群和石炭纪闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩中,表明其形成时代至

少晚于石炭纪。张宝山岩体最早获得的 K-Ar 年龄为 221.6 Ma(李福春等,2002),而顾连兴等(1994, 2007)对张宝山岩体天河石花岗岩 6 个全岩和 1 个斜长石样品进行了 Rb-Sr 同位素测年,获得 209.6 ± 9.6 Ma(相关系数 $R = 0.992$);同时获得天河石花岗岩中云母(铝黑鳞云母)的 K-Ar 年龄为 226.6 Ma,并认为张宝山岩体形成于印支晚期。在东天山地区目前已发现 2 个天河石花岗岩体,一个为本次研究的张宝山岩体,另一个为与其相距仅 35 km 的国宝山天河石花岗岩体,其岩体锆石 U-Pb 年龄介于 $242.1 \pm 2.4 \sim 240.3 \pm 1.8$ Ma 之间^③。通过综合对比研究,张宝山岩体成岩成矿时代应属三叠纪,表明该铷多金属矿床形成于印支晚期。

5.2 成矿作用

张宝山含铷岩体形成于印支期碰撞后板内伸展构造环境(王润民等,1984),岩体分异较好,相带清楚,由早到晚依次为淡色花岗岩→含天河石花岗岩→天河石花岗岩→含黄玉天河石花岗岩→黄玉钠长花岗岩,岩石地球化学特征显示岩石逐渐向富氟、富钠、富铷、铯方向演化的特点。张宝山含铷岩体的稀土元素含量呈规律性变化,随岩浆演化, LREE(轻稀土元素)含量及轻、重稀土元素分馏程度逐渐增加,负 Eu 异常明显,表明含铷岩体在成岩过程中发生过明显的结晶分异作用。电子探针分析表明,铷主要以类质同象赋存在造岩矿物钾长石及白云母中,而且矿脉中铷品位与这 2 种矿物含量呈正比,表明岩石成岩与成矿为统一过程。如前所

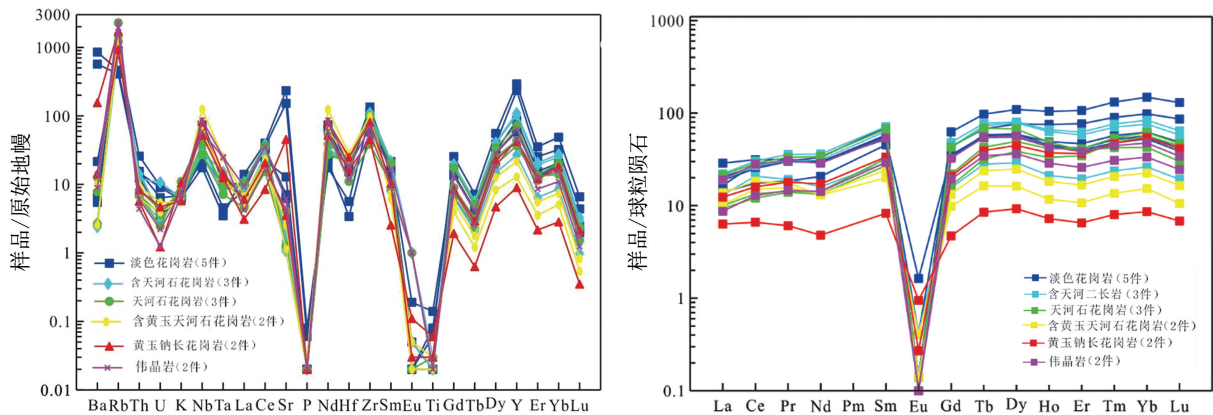


图 6 张宝山岩体球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

(原始地幔值和球粒陨石值据 Boynton, 1984)

Fig. 6 Standardized rare earth distribution pattern of chondrites in Zhangbaoshan rock mass(a) and the original mantle standardized trace elements(b)

述,张宝山含铷岩体越演化到晚期,铷品位越高,以及岩石明显的负 Eu 异常,表明成矿过程以结晶分异作用为主,稀土元素的含量从淡色二长花岗岩→含天河石花岗岩→天河石花岗岩呈渐次增高趋势,可能主要与分离结晶过程中稀土元素的不相容性有关。与华南许多富 F 花岗岩的特征类似(范飞鹏等,2014),都具稀土元素四分组效应的特征。这种特征是岩浆演化晚期熔体-流相互作用形成稀土元素四分组效应的主要原因(赵振华等,1992)。

稀有金属花岗岩的典型矿物组合钾长石-钠长石-黄玉-石英-锂云母在一定条件下可以共存,也证实了花岗岩形成过程中熔体-流体的共存(孙承轅等,1983)。此外,稀有金属花岗岩中挥发分 F、Cl 含量较高, F 含量超过普通花岗岩的 2 倍,而 Cl 的含量也高(Webster et al., 1989)。结合华南诸多稀有金属花岗岩成岩成矿时代,在这一时期发生了大规模的花岗岩岩浆活动,与此同时发生了稀有金属的成矿作用(Cerny et al, 1991;叶德隆等, 1991;洪大卫等, 1995;朱金初等, 2002;刘会文等, 2010;文春华等, 2017;吴福元等, 2017)。由前面讨论可知,地球化学特征反映出张宝山复式花岗岩经历了高程度的分异演化过程(刘会文等, 2010;朱金初等, 2002),在花岗岩体顶部相带 F 含量很高,且 F 含量随岩浆演化程度增加而增加,说明岩浆体的顶部因分异作用而富集流体和挥发分(Ponader et al., 1989;Keppler, 1993;杨兴武等, 2017)。张宝山岩体在高度演化过程中 F、H₂O 等挥发分逐渐富集,同时伴随着 Rb 富集,由于 F 与稀有金属元素有较强的亲和力,络合物一起迁移和富集, F 作为挥发分在熔体中表现为不相容(周凤英等, 1995),当岩浆演化到晚期,发生熔体-流体不混溶作用,稀有金属配合物被破坏。Rb 的富集主要是岩浆作用的结果, Rb 以类质同像进入到云母、长石矿物等(王京彬, 1990;叶松等, 2001; 2005;李建康等, 2012;刘翼飞等, 2014;李建领等, 2015)。张宝山铷矿中铷以类质同像形式在天河石花岗岩中富集成矿。对张宝山(白石头泉)复式岩体开展了流体包裹体研究(顾连兴等, 1994;杨兴武等, 2017),发现在各相带均可见熔融包裹体,以含天河石花岗岩、含黄玉天河石花岗岩中为主,熔体包裹体熔融温度分别为 850~790℃、810~660℃。熔融包裹体属岩浆包裹体(或称硅酸盐熔融包裹体),是典型的岩浆成因(周凤英

等, 1995;Simmons, 1998, 2003;陈乐柱等, 2014;赖杨等, 2016;张敏等, 2016;王守敬等, 2017;周玉等, 2018)。张宝山含铷花岗岩中熔融包裹体的存在,是岩浆成因的直接证据,表明成矿岩体岩浆经历过较强的岩浆结晶分异。而且从早至晚,从围岩到含矿岩体再到矿化岩体,岩浆结晶作用愈来愈强,含天河石花岗岩伟晶岩的出现,暗示岩浆演化末期已有含矿热液出溶。这种充分的岩浆结晶分异、岩浆不混溶作用促使岩浆后期挥发分及成矿物质的富集。岩浆冷却过程中收缩形成的矿物解理裂隙,为张宝山铷等稀有金属沉淀提供了良好的场所。含铷花岗岩钾化、钠长石化、云英岩化、钠长石化、钾长石化、电气石化、黄玉化等强烈的地段岩石 Rb 含量呈正相关,说明广泛的热液活动非常有利于铷矿的形成。因此确定,张宝山铷矿矿床属岩浆结晶分异和自交代成因,类型属岩浆-热液型矿床。

6 结 论

(1)张宝山含铷花岗岩体由早到晚依次侵入了淡色花岗岩、含天河石花岗岩、天河石花岗岩、含黄玉天河石花岗岩、黄玉钠长石花岗岩、含天河石花岗岩伟晶岩脉,具有在时间上连续逐变、出露面积由大变小、岩性由富钾至富钠、岩石结构由粗变的细特点;空间分布上由内而外、由下至上具规律性分带的特点,岩体中部段细粒钠长石化天河石花岗岩和含天河石花岗岩伟晶岩脉为主要含矿体,具全岩矿化特点。主要蚀变类型有钾化、钠长石化、云英岩化、钠长石化、钾长石化、黄玉化等。微斜长石(钾长石)、云母等为 Rb 等元素主要赋存矿物,为岩浆结晶分异晚期的产物。

(2)张宝山含铷花岗岩体岩石地球化学特征是高硅、富碱且 Na₂O>K₂O、高 F(>2%)、高 Rb, ΣREE 含量介于 21.4×10⁻⁶~190.4×10⁻⁶之间, Eu 具强烈的负异常,稀土元素配分模式具“M”型四分组效应,微量元素以富含 Li、Rb、Cs 等稀有元素为特征,为稀有金属矿化提供了物质基础。岩浆演化不同相带中 F 含量高,且寄主于云母中, F 与稀有金属元素形成络合物迁移到岩体中,形成铷富集。

(3)张宝山铷矿矿床属岩浆结晶分异和交代成因,类型属岩浆-热液型矿床,形成时代为印支晚期。

致谢:野外地质工作得到甘肃省地质调查院张

有奎高级工程师、黄增宝教授级高工的帮助,论文撰写过程中桂林理工大学罗先熔研究员、中国地质调查局发展研究中心李永胜研究员提供了宝贵的意见和建议,审稿专家对文章的修改提出了建设性意见,在此一并感谢。

注释

- ①甘肃省地质调查院.新疆哈密市张宝山铷多金属矿普查报告[R].2016.
- ②兰州有色冶金设计研究院有限公司.甘肃省瓜州县国宝山铷矿工业指标推荐书[R].2015.
- ③甘肃省地质调查院.甘肃瓜州县国宝山铷等稀有金属矿普查报告[R].2017.
- ④甘肃省地质调查院.新疆哈密市张宝山铷矿选矿试验报告[R].2016.

参考文献

- Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies [C]// Henderson P. Rare earth element geochemistry. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1984: 63-114.
- Cerny P. Fertile granites of Precambrian rare-element pegmatite fields: is geochemistry controlled by tectonic setting or source lithologies? [J]. Precambrian Research, 1991, 51(1/4): 429-468.
- Kepler H. Influence of fluorine on the enrichment of high field strength trace elements in granitic rocks [J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 1993, 114(4): 479-488.
- Norton J J. Lithium, cesium and rubidium—the rare alkali metals [C]// Brobst D A, Prah W P. United States Mineral Resources. U. S. Geological Survey Professional, 1973, 820: 365-378.
- Ponader C W, Brown G E. Rare earth elements in silicate, ja: math, systems: I. Effects of composition on the coordination environments of La, Gd, and Yb [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1989, 53(11): 2893-2903.
- Simmons E C. Rubidium: Element and geochemistry [C]// Geochemistry. Springer Netherlands, 1998: 555-556.
- Simmons W S, Webber K L, Falster A U, et al. Pegmatology: Pegmatite mineralogy, petrology and petrogenesis [M]. Rubellite Press, New Orleans, 2003.
- Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust [J]. Rev. Geophys., 1995, 33: 241-265.
- Webster J D, Holloway J R, Hervig R L. Partitioning of lithophile trace elements between H_2O and H_2O+CO_2 fluids and topaz rhyolite melt [J]. Economic Geology, 1989, 84(1): 116-134.
- 陈乐柱, 肖惠良, 范飞鹏, 等. 广东始兴良源铷钽钨多金属矿资源潜力及找矿方向 [J]. 矿床地质, 2014, 33(S1): 1-2.
- 范飞鹏, 肖惠良, 陈乐柱, 等. 南岭地区含铷花岗岩地质、地球化学特征 [J]. 矿床地质, 2014, 33(S1): 1163-1166.
- 顾连兴. 东疆星星峡地区白石头泉高铷氟花岗岩的特征和成因 [J]. 岩石学报, 1994, 10(1): 41-53.
- 顾连兴, 苟晓琴, 张遵忠, 等. 东天山一个多相带高铷氟花岗岩的地球化学及成岩作用 [J]. 岩石学报, 2003, 19(4): 585-600.
- 顾连兴, 吴昌志, 张遵忠, 等. 东疆白石头泉含黄玉天河石花岗岩体的地球化学: 分带和岩浆演化 [J]. 高校地质学报, 2007, 12(2): 207-223.
- 洪大卫, 王式洸, 韩宝福, 等. 碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志 [J]. 中国科学(B 辑), 1995, 25(4): 418-426.
- 贾志磊. 甘肃南祁连-北山铷钽铷等稀有金属成矿地质特征与成矿规律的研究 [D]. 兰州大学博士学位论文, 2016.
- 赖杨, 杨磊, 李丹峰, 等. 甘肃国宝山铷矿床矿石特征研究 [J]. 矿产综合利用, 2016, (3): 71-75.
- 李福春, 朱金初, 漆亮, 等. 富氟花岗岩体系岩浆流体内稀土元素演化规律的实验研究 [J]. 高校地质学报, 2002, 8(1): 10-16.
- 李华萍. 广东贵人峰铷矿床矿床地质特征及成因 [D]. 长江大学硕士学位论文, 2019.
- 李建康, 王永磊, 孙艳. 湖南桂东小江花岗岩体: 一个潜在 Rb-Nb-Y 矿床的岩石化学特征及其成矿远景 [J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(3): 350-356.
- 李建康, 刘强, 许令兵, 等. 河南嵩县石门铷矿地质特征及成因浅析 [J]. 矿产与地质, 2015, 29(2): 203-207.
- 李静萍, 许世红. 长眼睛的金属——铯和铷 [J]. 化学世界, 2005, 46(2): 85-85.
- 李胜虎. 华南典型花岗岩型稀有金属矿床的成矿机制与找矿模式研究 [D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2015.
- 李顺庭, 祝新友, 王京彬. 我国稀有金属矿床研究现状初探 [J]. 矿物学报, 2011, 31(S1): 256-7.
- 刘会文, 雷爱全, 刘长财. 青海省团保山长石铷矿床地质特征及成因分析 [J]. 西部探矿工程, 2010, 22(7): 117-119.
- 刘四海, 吴昌志, 顾连兴, 等. 中天山白石头泉岩体年代学、岩石成因及构造意义 [J]. 岩石学报, 2008, 24(12): 2720-2730.
- 刘翼飞, 樊志勇, 蒋胡灿, 等. 内蒙古维拉斯托-拜仁达坝斑岩-热液脉状成矿体系研究 [J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2373-2385.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景 [J]. 岩石学报, 2007, (10): 2329-38.
- 邵厥年, 陶维屏. 矿产资源工业要求手册 [M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- 孙承铤, 于镇凡, 李贤璇. 华南花岗岩类中锂、铷、铯的地球化学 [J]. 南京大学学报(自然科学版), 1983, (4): 731-744.
- 孙艳, 王瑞江, 李建康, 等. 锡林浩特石灰窑铷多金属矿床白云母 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 年代及找矿前景分析 [J]. 地质论评, 2015, 61(2): 463-468.
- 孙艳, 王登红, 王成辉, 等. 我国铷矿成矿规律、新进展和找矿方向 [J]. 地质学报, 2019, (6): 1232-1243.
- 王京彬. 湖南道县正冲稀有金属云英斑岩的特征和成因 [J]. 地质论评, 1990, 36(6): 534-539.
- 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.
- 王润民, 王志辉, 范怀仲, 等. 新疆白石头泉天河石花岗岩稀土元素丰度型式及其地质意义 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 1984, 1: 46.
- 王守敬, 刘璐, 海东靖. 甘肃国宝山铷矿工艺矿物学研究 [J]. 矿产保护

- 与利用, 2017, (3): 80-83.
- 文春华, 张进富, 肖冬贵, 等. 湖南省双峰县大坪钨矿地球化学特征及成矿作用[J]. 地质科技情报, 2017, 36(6): 94-103.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. 中国科学地球科学, 2017, 47(7): 745-765.
- 夏卫华, 章锦统, 冯志文. 南岭花岗岩型稀有金属矿床地质[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989.
- 杨兴武, 贾志磊, 王金荣, 等. 甘肃北山地区国宝山花岗岩稀土元素四分组效应及其意义[J]. 甘肃地质, 2017, 26(1): 25-31.
- 叶德隆, 任迎新, 邵道乾. 河北兴隆 M111 稀有金属花岗岩体地球化学和矿化特征研究[J]. 现代地质, 1991, 5(1): 13-23.
- 叶松, 元利剑, 罗永安, 等. 四川平武稀有金属花岗岩与绿柱石的成矿属性[J]. 地质科技情报, 2001, 20(2): 65-70.
- 叶松. 稀有金属花岗岩的特征及其成矿作用[J]. 岩石矿物学杂志, 2015, 34(5): 767-776.
- 袁忠信, 白鸽. 中国内生稀有稀土矿床的时空分布[J]. 矿床地质, 2001, (4): 347-54.
- 张敏. 广东省蕉岭县贵人峰钨矿床地质特征浅析[J]. 世界有色金属, 2016, (1): 40-41.
- 张学渊. 邓阜仙花岗岩体稀有有色金属矿床地质特征[C]//第四届全国矿床会议论文. 1989.
- 赵振华, 包志伟, 乔玉楼. 一种特殊的“M”与“W”复合型稀土元素四分组效应: 以水泉沟碱性正长岩为例[J]. 科学通报, 2010, (15): 1474-1488.
- 赵振华, 增田彰正, Shabani M B. 稀有金属花岗岩的稀土元素四分组效应[J]. 地球化学, 1992, (3): 221-233.
- 周凤英, 朱金初, 王汝成. 癞子岭黄玉云英岩中流体-熔融包裹体研究——黄玉云英岩成因的探讨[J]. 矿物学报, 1995, 15(3): 259-264.
- 周玉, 杨磊, 刘飞燕, 等. 西藏申扎县某钨矿床钨赋存状态研究[J]. 矿产保护与利用, 2018, (6): 81-86.
- 朱金初, 饶冰, 熊小林, 等. 富锂氟含稀有矿化花岗质岩石的对比和成因思考[J]. 地球化学, 2002, 31(2): 141-152.