

新疆巴楚瓦吉里塔格碱性岩有关的Nb-Ta-REE矿床 地质特征、地球化学及其成因*

魏博, 全孝勤, 张旗, 沈锐, 王伟平, 舒旭, 王利伟

(中国冶金地质总局 西北地质勘查院, 陕西 西安 710119)

摘要: 瓦吉里塔格碱性岩有关的Nb-Ta-REE矿床位于塔里木克拉通北缘,是近年来在塔里木北缘碱性岩带中发现的、具有代表性的稀有-稀土综合性矿床. 通过对其进行详细的矿床地质学、地球化学和构造环境研究,结果表明瓦吉里塔格碱性岩主要为中性-基性-超基性杂岩体,后期有碳酸岩脉、似金伯利岩岩筒及煌斑岩脉贯入. 地球化学特征显示其均属碱性岩系列,具有明显结晶分异特征. 碱性杂岩体(脉)的稀土配分曲线基本平行,均表现出LREE略富集、HREE亏损的右倾特征,轻稀土分馏特征较重稀土明显. 从辉石岩到辉长岩、再到霓霞正长岩类,∑REE含量逐渐增高,具较为一致的微量元素蛛网图曲线(富集大离子亲石元素,相对亏损高场强元素),具有同源演化特征. 岩石成因研究表明,镁铁质岩浆可能源自亏损的地幔源区,演化过程中经历了一定的橄榄石及辉石和钛铁氧化物的分离结晶,岩浆演化后期受到了一定程度的同化混染作用. 主体形成于晚石炭世-早二叠世的板内伸展构造环境. 碱性岩体中具有较好的碱性岩型稀有(Nb、Ta)矿产找矿前景,其中碳酸岩体(脉)具有较好的寻找碳酸岩型稀土矿的找矿前景.

关键词: 碱性岩; REE矿; 稀有金属矿; 瓦吉里塔格; 塔里木北缘

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2024.04.21.0001

中图分类号: P584; P618.6; P611.1+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2024)05-0606-014

引文格式: 魏博, 全孝勤, 张旗, 沈锐, 王伟平, 舒旭, 王利伟. 新疆巴楚瓦吉里塔格碱性岩有关的Nb-Ta-REE矿床地质特征、地球化学及其成因[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2024, 41(5): 606-619.

英文引文格式: WEI Bo, QUAN Xiaoqin, ZHANG Qi, SHEN Rui, WANG Weiping, SHU Xu, WANG Liwei. Geological characteristics, geochemistry and genesis of the Nb-Ta-REE deposit related to Wajilitage alkaline rock in Xinjiang of China[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2024, 41(5): 606-619.

Geological Characteristics, Geochemistry and Genesis of the Nb-Ta-REE Deposit Related to Wajilitage Alkaline Rock in Xinjiang of China

WEI Bo, QUAN Xiaoqin, ZHANG Qi, SHEN Rui, WANG Weiping, SHU Xu, WANG Liwei

(Northwest Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Xi'an Shaanxi 710119, China)

Abstract: The Nb-Ta-REE deposit related to Wajilitage alkaline rocks is located in the northern margin of Tarim Craton, which is a representative REE-rare comprehensive mine in the northern edge alkaline belt in Tarim. Through detailed geological, mineral geological, chronological, geochemical and tectonic environment studies, the results show that the alkaline rocks of Wajilitage are mainly neutral-basic-ultrabasic complexes, while the later period, there are carbonate, kimberlite-like rock tubes and porphyry lamprophyre intrusion. The geochemical characteristics show that they are all alkaline rock series and have obvious crystallization characteristics. The REE partition curves of alkaline complex (veins) are basically parallel, showing a slight enrichment of LREE and a right-leaning of HREE deficit. The fractionation characteristics of LREE are more obvious than that of HREE. From

* 收稿日期: 2024-04-21

基金项目: 中央财政项目“塔里木盆地西南缘锰多金属矿产地质调查”(121201001000150013); 中国冶金地质总局西北局科技创新项目“南疆地区战略性新兴矿产找矿前景与找矿方向研究”(XBJ-KJ-2020-5).

作者简介: 魏博(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事区域地质、矿产地质及构造地质研究, E-mail: weibochd@163.com.

pyroxene to gabbro and then to aegarine syenite, the content of \sum REE is gradually increased, with a relatively consistent spider diagram curve of trace elements (enrichment of large ion lithophile elements, relative loss of high field strength elements), with homologous evolution characteristics. Petrogenetic studies show that mafic magmas may originate from depleted mantle sources, and have undergone certain separation and crystallization of olivine, pyroxene and ferrotitanium oxides during the evolution process, and have been subjected to a certain degree of assimilation and mixing in the later stage of magmatic evolution. The formation age of the main body is late Carboniferous-Early Permian, formed in the intraplate extensional tectonic environment. The alkaline rock body has a good prospecting prospect for rare Nb and Ta minerals, and the carbonate rock body (vein) has a good prospecting prospect for rare earth minerals of carbonate rock.

Key words: alkaline rock; REE ore; rare metal ore; Wajilitage; northern margin of Tarim

0 引言

塔里木二叠纪大火成岩省的形成,伴随多种具有重要经济价值的矿床形成(如Cu-Ni-PGE矿床、Fe-Ti矿床、Nb-REE矿床)^[1-5].形成于大陆裂谷、板内(地幔柱/热点)、造山后伸展或者俯岛弧背景下的碱性岩,通常是形成稀有、稀土矿床主要的成矿岩体^[6-9],其成因上的特殊性以及对关键金属成矿等众多地球科学问题被广泛关注^[10-11].塔里木北缘巴楚-柯坪一带二叠纪碱性岩是稀有、稀土矿床最重要的成矿岩体^[4,12-14],但其成因一直以来争议较大.一部分学者认为碱性岩的形成与塔里木大火成岩省具有成因上联系^[15-18],可能形成于俯冲增生构造背景^[19];但有学者认为碱性杂岩体与塔里木大火成岩省成因上没有联系,而是在碰撞造山后伸展背景下形成的^[20-23].

以往瓦吉里塔格一带主要在碳酸岩脉中发现稀土矿,近年来在碱性角闪正长岩及方钠霓霞正长岩中Nb-Ta-REE矿的相继发现,为该地区碱性岩Nb-Ta-REE矿找矿提供了新的方向.但是缺少对该稀有、稀土矿床成因的系统研究,一方面,目前对该杂岩体中碱性岩的成矿动力学背景争议很大;另一方面,碱性岩同时伴生较大规模的稀土、Nb、Ta矿产,资源成矿时代、矿床成因不清楚,导致其成矿动力学背景不明.

本文对塔里木北缘瓦吉里塔格地区碱性杂岩体开展了详细的野外地质、岩石学、全岩地球化学研究.通过该碱性杂岩体不同岩性的地球化学分析、结合年代学讨论,对稀有、稀土元素的富集因素进行了探讨,旨在分析讨论碱性岩成因指示、碱性岩稀土、稀有矿床形成时限和成矿动力学背景.

1 区域地质背景

研究区大地构造上属于塔里木微板块,跨柯坪前陆盆地与塔里木中央地块,两者基本上以柯坪塔格断裂为界.区内褶皱、断裂构造较为发育.塔里木地块主要由前寒武纪基底和上覆的古生代沉积地层组成.前寒武纪基底主要形成于太古代、古元古代、中元古代和新元古代^[24].研究区地层大部分被第四系覆盖,在小海子水库及瓦吉里塔格附近零星出露,主要以奥陶系-上二叠统为主.奥陶系主要为一套碳酸盐岩建造,志留系主要为一套碎屑岩夹泥质岩建造,泥盆-石炭系主要为碎屑岩夹碳酸盐岩,二叠系主要为一套紫红色泥质岩夹碎屑岩、煤层建造.岩浆岩主要以太古代、元古代和早二叠世岩浆活动为主.其中早二叠世的岩浆活动最为广泛,形成了大规模的溢流玄武岩、超基性-基性侵入岩、基性岩墙群和A型花岗岩类等^[4].

瓦吉里塔格一带、小海子水库一带岩浆岩相对发育.小海子水库一带出露的镁铁质岩石呈半环形,大部分被第四系沙、砾石、黏土所覆盖,岩体主要由橄榄岩、橄辉岩、辉石岩、辉长岩等组成.瓦吉里塔格侵入岩主要为晚古生代侵入的超镁质-镁铁质岩体、碱性岩体,岩浆活动晚期有大量脉岩产出,杂岩体是引起该地区强磁异常带的主要磁性体,侵位于泥盆系红色砂岩构成的穹窿背斜中,不协调侵入,局部存在两者的整合关系,杂岩体中部仍可见部分砂岩零星露头,杂岩体剥蚀深度不大,南北长约5 km,东西宽约1.5~3 km,面积约12.5 km².该杂岩体由三大部分组成:1)深成层状岩体;2)隐爆金伯利质煌斑岩岩筒(脉);3)煌斑岩岩脉^[25].

岩体活动晚期有大量的正长岩脉、霓辉正长岩脉、霓霞正长岩脉、闪长玢岩脉、煌斑岩岩脉、碳酸岩脉出露,在杂岩体及沉积地层内均有分布,工作统计各类岩脉500余条.岩脉产状近直立,在层状杂岩体内呈放射状,围岩内走向为NE,推测南天山与塔里木在挤压碰撞后形成了东西方向的引张,产生了滞留空间.煌斑岩脉与层状岩体和角砾岩筒并非同源,是基性杂岩体最晚期活动的产物.镁铁质岩体基本上侵入到上泥盆统盖层中,近年来获得岩体形成的时间是306~357.9 Ma(石炭系),正长岩形成时代为(279.7±2.0) Ma;获得岩脉中微粒闪长岩脉K-Ar年龄为231.3 Ma;金伯利煌斑岩中金云母单矿物Ar-Ar坪年龄为252.7 Ma^[12].瓦吉里塔格钒钛磁铁矿

和普昌钒钛磁铁矿均产于早二叠世晚期的基性杂岩体。

2 杂岩体及矿床地质特征

2.1 杂岩体基本特征

瓦吉里塔格一带广泛出露的碱性岩体或碱性岩脉,岩石类型包括霓霞正长岩、霓霞岩、正长斑岩及碳酸岩等,与已发现的稀土、稀有矿产分布、矿化密切相关,为区内碱性岩型稀有、稀土矿主要含矿岩体。

瓦吉里塔格杂岩体自早到晚(早二叠世末)形成橄榄岩-橄榄辉石岩-辉石岩(含铁)-碱性辉长岩(281~284 Ma)、碱性角闪正长岩、方钠霓霞正长岩组成的杂岩体,后期(晚二叠世-早三叠世)有碳酸岩脉、似金伯利岩(金伯利质煌斑岩)岩筒(252.7 Ma)及煌斑岩脉(231.3 Ma)贯入^[12,15]。岩体与地层为不协调的侵入接触,局部呈港湾状穿切围岩,有的围岩呈“岩被”状残留于岩体之上。南部辉石岩是著名的瓦吉里塔格钒钛磁铁矿的主要含矿岩石,具有中粗粒自形粒状、海绵陨铁结构和局部的“层状”构造。岩石主要由普通辉石和含钛磁铁矿组成。

区内大型的碱性岩体相对较少,规模较大的主要为正长岩体,包括霓霞正长岩和角闪正长岩,分别见于研究区中部及南部,其中以北部中段的霓霞正长岩体出露面积最大。正长岩体多就位于层状岩体的顶部,平面图中常显示被超镁铁质-镁铁质岩石包围(图1(c))。碱性岩脉则极为发育,区内广泛出露,规模不一,长度为几米至几百米不等,宽度为0.5~3.0 m不等。野外调查显示工作区脉体具有由中心向周边呈一定放射状分布的趋势,放射中心大致位于霓霞正长岩至南侧镁铁质岩附近,该特征与北东向和北西向两组线性构造可能具有一定的联系。碳酸岩脉是研究区重要的含矿(化)地质体,集中分布于工作区霓霞正长岩北侧中段超基性-基性岩内,形成一个碳酸岩脉集中区,工作区东侧也有零星分布,地层内少见,部分碳酸岩脉侵入到煌斑岩中,显示其形成时间晚于金伯利质煌斑岩,脉体以近东西向脉组规模较大,产状以 $161^{\circ}\sim 203^{\circ}/70^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 为主,脉长60~800 m,厚0.3~5.0 m不等;煌斑岩脉分布广泛,不仅见于层状岩体,而且发育于泥盆纪地层红色砂岩中,层状岩体内部及周围煌斑岩脉多呈放射状排列,围岩中走向多为北东向。区内还见闪长岩脉广泛出露。

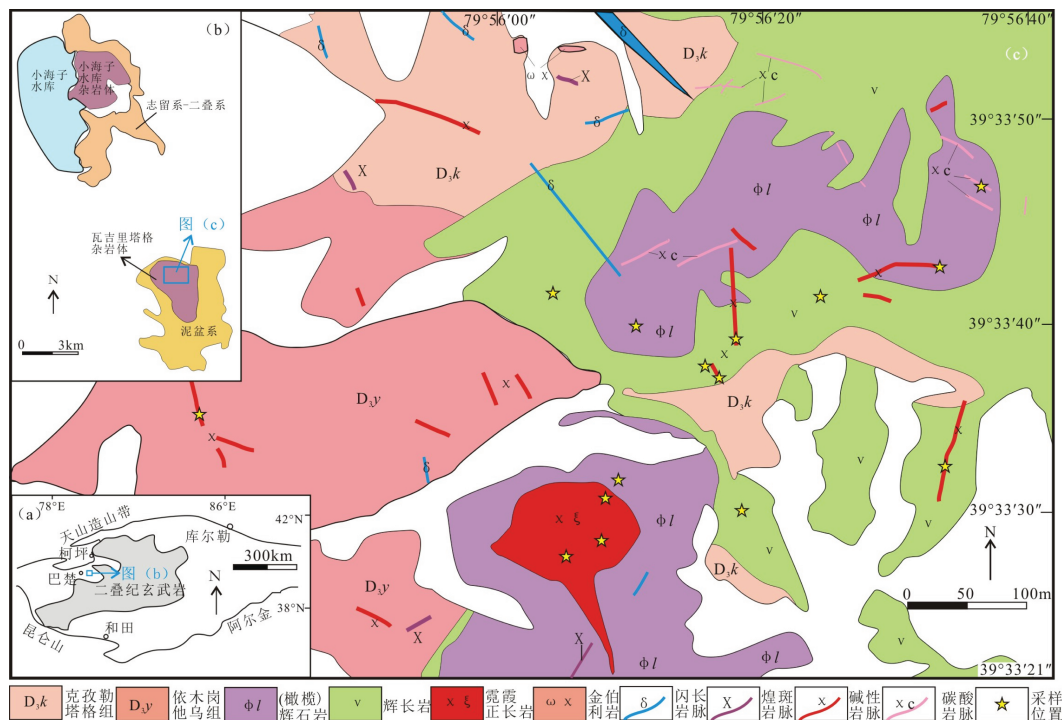


图 1 瓦吉里塔格一带地质简图

瓦吉里塔格一带构造行迹可见区域的环形构造及北东向和北西向的两组线性构造。断裂呈网格状逆向扭动,是深断裂次级构造和熔岩构造,反映了岩体入侵时为顺时针旋转。侵入体对盖层所造成的拱形-穹窿是本区最典型的构造特征。北西、北东两组线性构造控制着瓦吉里塔格一带碱性脉体的分布及延伸,部分含稀土、稀有矿化脉体局部呈放射状分布,因此,该方向断裂可能为主要控矿构造。

2.2 岩体矿化特征

共发现铌钽矿化碱性岩脉数十条,含铌钽矿化霓霞正长岩体1处,铌钽矿化及稀土矿化碳酸岩脉数十条。区内碱性脉体(如正长岩脉、碳酸岩脉等)多成群出现,多条脉体平行排列,多者可达7~10条(图1(c))。碳酸岩脉稀土矿化及碱性岩类Nb、Ta、稀土矿化一般为全脉矿化,脉体、岩体形态即为矿体形态,矿(化)体通常为板脉状、透镜状。碳酸岩型铌钽矿脉与稀土矿脉关系密切,共生产出。一般含矿的碱性脉体略为破碎,不含矿的相对完整。矿化体顶底板围岩主要为辉石岩、含长辉石岩、(碱性)辉长岩等,部分碱性岩脉矿化体围岩为古生代沉积地层,矿体与围岩分界明显,部分碳酸岩脉围岩因强碳酸岩化也具稀土矿化。

铌钽矿体地表长度100~500 m,地表宽度0.5~3.0 m。铌钽(Nb+Ta)品位为0.024 2%~0.208 7%。含矿岩体为霓霞正长岩体以及正长(斑)岩脉,霓霞(斑)岩脉、碳酸岩脉、正长闪长岩脉,其中霓霞正长岩体出露面积约0.035 km²。

稀土矿体地表长约100~500 m,地表宽度0.5~5.0 m,稀土含量(REO)为0.653 4%~1.139 2%,铌钽(Nb+Ta)品位为0.016 4%~0.061 7%,含矿岩体主要为碳酸岩脉。

铌钽矿化矿石类型包括碱性岩型及碳酸岩型两大类,具体包括霓霞正长岩、正长(斑)岩、霓霞(斑)岩、正长闪长岩及碳酸岩等。矿石构造包括块状、条带状。不同的岩石类型其矿物组成各有不同,多种多样。研究表明火成碳酸岩脉型铌钽矿矿石矿物主要为烧绿石,邹天人等通过电子探针测定也证实碳酸岩型稀土-铌矿中的含铌矿物主要为烧绿石^[12]。

稀土矿化矿石类型全为碳酸岩型。矿石构造包括条带状及斑杂状,条带状矿石与斑杂状矿石组合中:条带状矿石多在矿化体中部,少量在边部;脉宽部位中多为斑杂状,脉细者为条带状。碳酸岩型稀土矿床(化)的主要矿物为铁白云石和方解石,次为天青石和磷灰石,偶有黄铁矿、钾长石等;前人通过电子探针测定稀土矿物主要为独居石^[12]。

3 测试方法

用于岩石地球化学研究的17件碱性岩样品采自巴楚县瓦吉里塔格碱性杂岩体内(图1(a))。岩石地球化学样品分别进行主量元素和微量元素分析测试,测试在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室完成。主量元素使用X射线荧光光谱仪(XRF-1500)法测试,精度优于2%~3%,测定流程包括烧失量的计算和玻璃熔融制样,全岩稀土和微量元素分析,采用Thermo-X7电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)完成,分析精度和准确度优于10%。化学分析测试流程参阅文献[26-27]。

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素地球化学特征

由表1可知,辉石岩类样品SiO₂的含量为36.10%~40.99%,变化范围不大,含量较低,平均为38.55%。全碱含量(Na₂O+K₂O)为1.42%~1.86%,变化范围较小,Na₂O含量大于K₂O,相对富Na贫K;TiO₂含量较高,为4.82%~6.84%,明显高于岛弧型岩浆岩(0.98%)、洋脊拉斑玄武岩(1.5%)和洋岛拉斑玄武岩(2.63%)^[28]、板内拉斑玄武岩(2.23%)含量,与板内碱性玄武岩(2.9%)的含量更为接近;MgO含量为10.27%~11.06%,Mg[#](Mg[#]=MgO/(MgO+FeO^T))值为53~58,低于原生岩浆Mg[#]值(68~75)^[28],岩浆可能经历了一定的结晶分异作用;Al₂O₃的含量较低,为5.71%~6.34%;TFe₂O₃含量较高,为18.85%~21.01%。

辉长岩类SiO₂含量相对较低,为43.40%~51.38%,平均为46.1%,略低于典型辉长岩的相应值(47.62%),属基性岩类;Na₂O含量基本大于K₂O,平均含量分别为4.82%和1.79%,全碱含量(Na₂O+K₂O)介于4.92%~8.36%,全碱含量总体较高;P₂O₅含量为0.64%~0.82%;TiO₂含量较高,为2.05%~4.44%,平均为3.70%,明显高于洋脊拉斑玄武岩(1.5%)和洋岛拉斑玄武岩(2.63%)^[28]的含量,与板内碱性玄武岩(2.9%)更为接近,反映其形成可能与板内环境有关;Al₂O₃含量较高,介于11.85%~16.60%,平均为14.66%;TFe₂O₃含量介于8.63%~15.91%;MgO含量为3.45%~6.53%,Mg[#]值较低,为44~49,低于原生岩浆Mg[#]值(68~75)^[28],暗示辉长岩类可能经历了一定的演化。总的来说,瓦吉里塔格地区辉长岩类较高的TiO₂、K₂O等特征,与板内玄武岩的地球化学特征更为接近。

霓霞正长岩SiO₂含量为53.39%~54.13%,平均为53.76%;Na₂O含量基本大于K₂O,平均含量分别为10.28%和4.75%,全碱含量(Na₂O+K₂O)总体较高,介于14.87%~15.20%;P₂O₅含量为0.14%~0.19%,较辉长岩类

低; TiO_2 含量较低, 平均为0.69%; Al_2O_3 含量较高, 介于18.42%~19.74%, 平均为19.08%, A/CNK (摩尔 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$) 为0.68~0.73, A/NK (摩尔 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$) 为0.84~0.89, 属过碱质。

角闪正长岩类 SiO_2 含量为58.45%~59.00%, 平均为58.66%; Na_2O 含量大于 K_2O , 平均含量分别为6.85%和4.16%, 全碱含量($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)介于10.70%~11.40%, 总体较高; P_2O_5 含量为0.23%~0.34%, 较辉长岩类低; TiO_2 含量较低, 平均为0.90%; Al_2O_3 含量较高, 介于16.63%~16.93%, 平均为16.75%, A/CNK 为0.76~0.81, A/NK 为1.02~1.09, 属准铝质。

表 1 瓦吉里塔格杂岩体岩石主量元素含量(%)分析结果及重要参数

编号	岩性	SiO_2	Al_2O_3	TFe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	MnO	TiO_2	P_2O_5	LOI	Total	FeO
KS21-YQ34	辉石岩	40.99	5.71	18.85	11.06	16.69	1.05	0.37	0.17	4.82	0.11	0.01	99.85	9.47
KS21-YQ36	辉石岩	36.10	6.34	21.01	10.27	16.79	1.35	0.51	0.19	6.84	0.29	0.17	99.86	11.00
KS21-YQ1	辉长岩	45.09	14.34	14.40	4.49	8.17	3.86	1.74	0.18	4.41	0.78	2.34	99.80	6.82
KS21-YQ35	辉长岩	45.13	14.62	13.35	4.41	8.03	5.03	1.74	0.17	3.83	0.81	2.62	99.74	6.78
KS21-YQ50	辉长岩	51.38	16.60	8.63	3.45	5.45	7.18	1.18	0.10	2.05	0.66	3.09	99.77	3.68
KS21-YQ62	辉长岩	43.40	11.85	15.91	6.53	9.34	4.29	0.63	0.17	4.44	0.64	2.63	99.84	7.13
KS21-YQ5	辉绿岩	45.56	15.89	12.73	4.12	7.97	3.76	3.65	0.16	3.78	0.82	1.27	99.72	5.82
KS21-YQ58	霓霞岩	37.49	10.79	17.41	8.51	14.81	2.82	0.93	0.19	5.27	1.34	0.19	99.75	9.08
KS21-YQ2	正长岩	47.31	14.80	12.51	4.69	7.53	4.19	2.38	0.24	3.26	0.75	2.14	99.79	5.48
KS21-YQ14	正长岩	43.78	13.72	14.48	4.94	8.63	3.85	2.04	0.34	4.48	0.81	2.75	99.82	6.23
KS21-YQ47	霓霞正长岩	53.39	18.42	4.72	0.70	2.96	10.26	4.61	0.19	0.79	0.19	3.16	99.38	1.32
KS21-YQ48	霓霞正长岩	54.13	19.74	4.02	0.62	2.58	10.30	4.90	0.15	0.59	0.14	2.35	99.51	1.23
KS21-YQ64	角闪正长岩	58.65	16.63	5.77	1.85	3.50	6.64	4.35	0.10	1.36	0.34	0.57	99.77	2.47
KS21-YQ66	角闪正长岩	58.52	16.78	6.85	0.82	3.14	6.75	3.95	0.17	0.77	0.23	1.72	99.70	2.18
KS21-YQ67	角闪正长岩	58.45	16.93	7.19	0.88	2.84	7.06	3.92	0.19	0.75	0.23	1.21	99.66	2.20
KS21-YQ68	角闪正长岩	59.00	16.66	6.73	0.98	2.46	6.97	4.43	0.16	0.74	0.25	1.35	99.71	1.92
KS21-YQ55	碳酸岩	1.05	0.62	4.12	20.74	26.01	0.32	1.04	0.49	0.03	0.73	43.77	98.93	2.57

TAS岩石分类图解(图2)中, 所有岩石样品均落在碱性区域范围内, 显示镁铁-超镁铁质岩、正长岩、角闪正长岩等均属于碱性系列岩石。

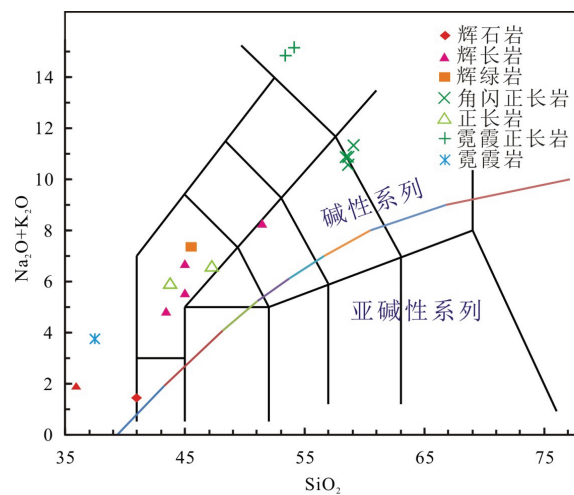


图 2 瓦吉里塔格杂岩体硅-碱图(据文献[29]修改)

在 SiO_2 与其它氧化物变异关系的Harker图解(图3)中, 瓦吉里塔格各岩体单元的成分点分布具有一定的规律性, 它们具有固定的演化趋势: 随 SiO_2 含量的增加, TiO_2 、 TFe_2O_3 、 MgO 、 MnO 、 P_2O_5 和 CaO 逐渐降低; Na_2O 、 K_2O 、 Al_2O_3 随着 SiO_2 增加而升高. 说明该杂岩体在岩浆演化过程中可能经历了橄榄石、含Ti普通辉石、磷灰石的结晶分异, TFe_2O_3 、 MgO 、 MnO 、 CaO 随 SiO_2 增高而降低, 碱质含量则增高。

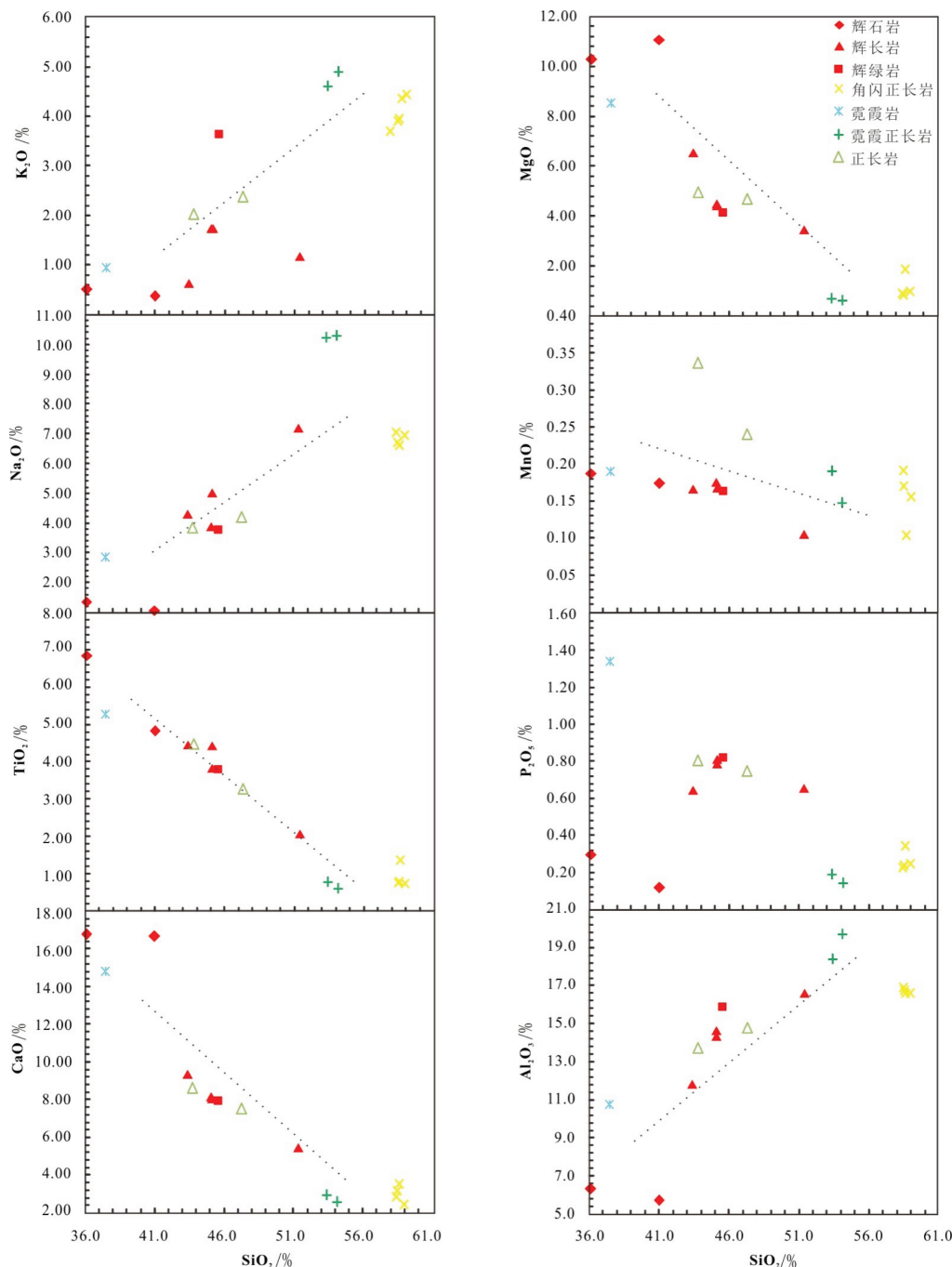


图 3 瓦吉里塔格杂岩体主量元素Harker图解

4.2 稀土及微量元素地球化学特征

本次样品结果显示,瓦吉里塔格地区杂岩体的各岩石类型基本具有相对一致的REE分配模式(图4),均表现出LREE略富集、HREE亏损的右倾特征,轻稀土分馏特征较重稀土明显.瓦吉里塔格各岩石类型的稀土曲线基本平行,从辉石岩到辉长岩、再到霓霞正长岩类,∑REE含量逐渐增高,暗示其各岩石之间具有同源岩浆分离结晶的特征.所有岩石的REE含量均较高(表2),其中:辉石岩类∑REE为 $131 \times 10^{-6} \sim 159 \times 10^{-6}$,为球粒陨石的40~48倍,∑LREE/∑HREE比值为6.47~7.13, $(La/Sm)_N$ 介于1.35~1.62, $(La/Yb)_N$ 介于7.37~9.14, $(Gd/Yb)_N$ 介于3.28~3.33,表明轻重稀土分馏明显,但轻稀土内部分馏不明显.辉长岩类∑REE为 $264 \times 10^{-6} \sim 375 \times 10^{-6}$,为球粒陨石的80~113倍,∑LREE/∑HREE比值为9.12~12.4, $(La/Sm)_N$ 介于2.49~3.71, $(La/Yb)_N$ 介于12.8~20.6, $(Gd/Yb)_N$ 介于3.14~3.43,表明轻重稀土分馏明显,但轻稀土内部分馏不明显.角闪正长岩∑REE为 $295 \times 10^{-6} \sim 390 \times 10^{-6}$,为球粒陨石的90~119倍,∑LREE/∑HREE比值为12.8~15.7, $(La/Sm)_N$ 介于4.89~6.24, $(La/Yb)_N$ 介

于19.2~26.3, $(Gd/Yb)_N$ 介于2.40~2.73, 表明轻重稀土分馏明显, 但重稀土内部分馏不明显. 霓霞岩 $\sum REE$ 为 428×10^{-6} , 为球粒陨石的130倍, $\sum LREE/\sum HREE$ 比值为10.2, $(La/Yb)_N$ 为20.1. 霓霞正长岩 $\sum REE$ 为 $406 \times 10^{-6} \sim 829 \times 10^{-6}$, 为球粒陨石的123~252倍, $\sum LREE/\sum HREE$ 比值为19.0~19.7, $(La/Sm)_N$ 介于9.53~9.65, $(La/Yb)_N$ 介于32.0~35.4, $(Gd/Yb)_N$ 介于2.35~2.59, 表明轻重稀土分馏明显, 但重稀土内部分馏不明显, 霓霞正长岩的轻稀土富集程度较其它岩性更高. 宏观上, 辉石岩、辉长岩、角闪正长岩、霓霞岩、霓霞正长岩, 样品REE含量逐渐增高、富集, 轻重稀土分馏逐渐明显, 且轻稀土内部分馏特征也有增强的趋势. 所有样品的 δEu 介于0.91~1.54, 平均为1.02, 多数样品均未见明显的Eu异常; 其中霓霞正长岩的 δEu 值多大于1, 在稀土元素配分曲线中有弱的正异常, 可能存在斜长石的堆晶. 碳酸岩类的稀土配分模式呈现明显的右倾形态, 其 $\sum REE$ 含量为 2880×10^{-6} , 为球粒陨石的875倍, 较其它岩石类型极为富集, $\sum LREE/\sum HREE$ 比值为20.2, $(La/Sm)_N$ 为2.81, $(La/Yb)_N$ 为96.0, $(Gd/Yb)_N$ 为16.9, 表明轻重稀土分馏极为明显且含量较高, 轻稀土内部分馏不明显, 重稀土较为明显.

表 2 瓦吉里塔格杂岩体岩石微量元素含量 ($\times 10^{-6}$) 分析结果及重要参数

编号	岩性	Li	Be	Sc	V	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	In	Cs
KS21-YQ34	辉石岩	14.4	1.07	53.4	439	82.5	141	114	181	20.8	15.7	207	186	20.8	0.86	0.20	2.53
KS21-YQ36	辉石岩	8.5	1.11	55.8	480	94.9	133	208	205	22.2	12.6	247	260	42.5	1.01	0.14	0.58
KS21-YQ1	辉长岩	18.5	2.47	25.2	294	41.5	38.9	216	181	27.1	42.3	553	378	79.3	1.91	0.13	2.90
KS21-YQ35	辉长岩	26.6	2.80	20.4	237	35.5	9.34	48.7	161	27.0	41.7	927	354	84.9	2.57	0.17	2.42
KS21-YQ50	辉长岩	12.2	2.31	17.6	134	14.7	10.11	30.7	120	26.7	37.0	830	268	56.4	1.24	0.11	1.37
KS21-YQ62	辉长岩	16.6	2.04	30.3	261	52.5	64.84	312	267	25.2	16.4	508	282	60.5	2.14	0.14	0.29
KS21-YQ5	辉绿岩	30.7	2.70	18.9	274	37.2	27.31	99.3	149	28.1	106	880	368	98.9	3.01	0.088	7.13
KS21-YQ58	霓霞岩	14.9	2.40	33.0	275	62.0	104	95.9	221	28.5	24.1	999	237	70.3	2.74	0.19	2.64
KS21-YQ2	正长岩	20.5	2.44	21.6	238	35.6	26.02	59.6	322	26.4	55.4	546	347	68.4	1.96	0.11	0.52
KS21-YQ14	正长岩	26.2	2.87	22.1	331	42.4	37.01	154	171	28.0	58.5	514	340	82.9	2.05	0.16	2.08
KS21-YQ47	霓霞正长岩	38.4	11.35	11.4	40.8	5.14	4.75	13.0	162	41.2	123	2441	998	209	11.0	0.11	4.63
KS21-YQ48	霓霞正长岩	44.6	6.44	8.84	40.0	4.73	3.95	10.7	120	40.3	116	1792	586	143	8.15	0.088	2.10
KS21-YQ64	角闪正长岩	13.4	5.18	11.5	79.4	12.6	17.0	17.0	94.9	30.6	133	604	478	95.6	3.11	0.095	2.20
KS21-YQ66	角闪正长岩	15.0	3.21	8.29	4.73	4.94	1.87	10.4	107	29.5	78.7	622	326	92.3	3.96	0.10	1.67
KS21-YQ67	角闪正长岩	16.3	5.40	8.78	4.08	5.17	1.84	8.88	152	32.5	89.1	723	454	118	5.09	0.11	1.92
KS21-YQ68	角闪正长岩	31.1	4.13	8.21	11.4	4.01	2.27	10.8	136	30.5	89.4	585	381	106	5.89	0.12	1.78
KS21-YQ55	碳酸岩	8.81	2.02	21.7	32.4	6.19	8.10	3.19	53.5	15.3	5.44	8066	28.3	108	5.94	0.13	1.87
编号	岩性	Ba	Hf	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U	Cr	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm
KS21-YQ34	辉石岩	674	6.28	1.21	0.51	0.52	9.62	0.39	1.32	0.36	291	21.7	17.0	46.7	6.96	33	7.93
KS21-YQ36	辉石岩	214	7.61	2.11	1.16	0.043	2.67	0.04	2.31	0.49	82.9	25.5	23.5	56.8	8.65	39	9.09
KS21-YQ1	辉长岩	644	10.9	3.93	1.29	0.27	13.7	0.05	7.47	1.82	10.9	37.4	65.2	133	17.2	68	13.7
KS21-YQ35	辉长岩	1315	10.5	3.94	1.59	0.42	7.74	0.25	7.39	1.78	9.76	40.7	68.4	143	18.0	72	14.1
KS21-YQ50	辉长岩	1262	8.06	2.34	0.83	0.35	5.65	0.31	6.52	1.42	13.8	31.5	61.7	129	15.9	62	11.4
KS21-YQ62	辉长岩	230	8.47	2.65	0.97	0.081	2.74	0.58	5.15	1.23	23.9	34.8	46.4	105	14.0	57	11.7
KS21-YQ5	辉绿岩	1263	10.9	4.62	1.09	0.29	8.86	0.05	9.23	2.33	20.1	33.4	78.9	157	19.3	74	13.4
KS21-YQ58	霓霞岩	1211	8.85	2.79	0.71	0.51	25.7	0.46	6.64	1.11	140	46.1	79.7	161	23.6	100	20.1
KS21-YQ2	正长岩	795	10.5	3.19	1.11	0.32	29.5	0.10	7.71	1.75	27.0	34.6	67.1	135	17.3	68	13.1
KS21-YQ14	正长岩	985	10.7	3.92	1.00	0.64	9.85	0.38	7.33	1.82	13.2	39.2	70.1	147	18.8	76	14.9
KS21-YQ47	霓霞正长岩	2695	22.8	6.27	11.4	0.58	39.8	0.43	59.5	9.69	11.1	55.9	248	369	37.0	114	16.2
KS21-YQ48	霓霞正长岩	1980	13.1	3.05	2.52	0.48	33.6	0.36	23.7	4.53	10.7	27.8	122	179	18.4	56	8.04
KS21-YQ64	角闪正长岩	1473	13.0	4.48	1.53	0.41	18.0	0.18	20.6	2.81	21.2	25.3	85.0	140	14.9	53	8.56
KS21-YQ66	角闪正长岩	2110	8.40	3.70	2.00	0.35	13.5	0.16	8.95	1.75	10.4	27.0	71.1	128	14.2	50	8.39
KS21-YQ67	角闪正长岩	2357	11.9	5.07	2.09	0.35	20.3	0.17	14.7	3.11	10.4	36.0	98.4	168	19.0	64	10.6
KS21-YQ68	角闪正长岩	1941	9.61	3.98	3.77	0.36	26.8	0.27	11.0	1.92	10.5	33.7	80.3	144	16.3	60	10.3
KS21-YQ55	碳酸岩	2564	0.79	0.19	1.15	0.44	126	0.89	162	1.20	24.2	81.9	581	1210	156	633	130

续表 2

编号	岩性	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	δEu	$\sum REE$	$\frac{\sum LREE}{\sum HREE}$	(La/Sm) _N	(La/Yb) _N	(Gd/Yb) _N
KS21-YQ34	辉石岩	2.36	6.32	1.01	5.08	0.86	2.28	0.27	1.56	0.22	0.33	131	6.47	1.35	7.37	3.28
KS21-YQ36	辉石岩	2.47	7.15	1.14	5.81	0.96	2.26	0.31	1.73	0.25	0.31	159	7.13	1.62	9.14	3.33
KS21-YQ1	辉长岩	3.92	11.2	1.68	8.37	1.41	3.52	0.47	2.75	0.39	0.32	332	10.1	2.99	16.0	3.29
KS21-YQ35	辉长岩	4.22	11.7	1.75	8.86	1.50	4.01	0.50	3.00	0.43	0.33	351	10.0	3.04	15.4	3.15
KS21-YQ50	辉长岩	3.39	9.2	1.32	6.46	1.10	3.06	0.38	2.26	0.32	0.33	307	11.7	3.41	18.4	3.30
KS21-YQ62	辉长岩	3.33	9.5	1.46	7.32	1.25	3.29	0.42	2.45	0.36	0.32	264	9.12	2.49	12.8	3.14
KS21-YQ5	辉绿岩	3.93	11.0	1.56	7.54	1.26	3.24	0.44	2.58	0.36	0.32	375	12.4	3.71	20.6	3.43
KS21-YQ58	霓霞岩	5.67	15.9	2.25	10.50	1.68	4.19	0.48	2.68	0.36	0.32	428	10.2	2.50	20.1	4.80
KS21-YQ2	正长岩	3.78	10.7	1.58	7.82	1.34	3.33	0.45	2.62	0.38	0.32	333	10.8	3.22	17.3	3.29
KS21-YQ14	正长岩	4.31	12.2	1.82	8.96	1.50	4.01	0.49	2.82	0.40	0.32	363	10.2	2.97	16.8	3.50
KS21-YQ47	霓霞 正长岩	4.91	15.2	1.96	9.72	1.79	5.25	0.76	4.73	0.67	0.31	829	19.7	9.65	35.4	2.59
KS21-YQ48	霓霞 正长岩	2.58	7.49	0.98	4.85	0.90	2.73	0.39	2.57	0.41	0.33	406	19.0	9.53	32.0	2.35
KS21-YQ64	角闪 正长岩	2.67	7.36	1.00	4.92	0.86	2.43	0.34	2.17	0.32	0.34	324	15.7	6.24	26.3	2.73
KS21-YQ66	角闪 正长岩	3.94	6.94	1.02	5.19	0.92	2.54	0.35	2.26	0.33	0.52	295	14.1	5.33	21.2	2.48
KS21-YQ67	角闪 正长岩	4.09	9.00	1.30	6.69	1.20	3.38	0.50	3.03	0.44	0.42	390	14.3	5.84	21.9	2.40
KS21-YQ68	角闪 正长岩	3.62	8.58	1.26	6.46	1.15	3.29	0.46	2.82	0.43	0.38	338	12.8	4.89	19.2	2.46
KS21-YQ55	碳酸岩	34.2	85.6	8.41	25.3	3.08	8.48	0.66	4.08	0.51	0.32	2 880	20.2	2.81	96.0	16.9

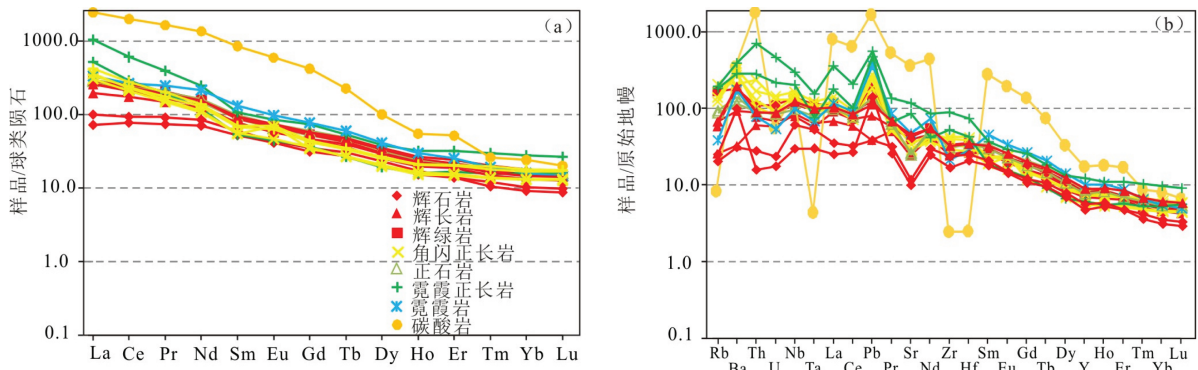


图 4 瓦吉里塔格杂岩体样品球粒陨石标准化REE配分模式图 (a) 和原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b) (数据引自文献[30-31])

岩石微量元素原始地幔标准化蛛网图(图4(b))中,各岩石样品之间的差异性不大,除部分元素外,各单元岩石比值曲线近于平行,整体具有一致的元素特征,瓦吉里塔格杂岩体内镁铁质岩、霓霞岩及角闪正长岩等可能是同源的.辉长岩类样品具有较高的Ti/Y比值(391~765),与峨眉山大火成岩省的高钛玄武岩相似^[32].蛛网图中除辉石岩样品外,其它所有样品的Ba、Th、U元素相对富集,Y、Yb、Lu元素相对亏损,尤其是Ba、Th等元素富集特征明显.高场强元素中未见Nb、Ta负异常,个别样品可见正异常,该微量元素分布及曲线特征与洋岛玄武岩、板内玄武岩大隆起的特征有一定相似性.而部分样品Pb元素正异常可能暗示岩浆演化中有地壳物质的混染.

5 讨论

5.1 岩石成因及构造环境

瓦吉里塔格辉石岩、辉长岩、角闪正长岩等岩石样品相似的REE和微量元素分布形式, 暗示其具有一定的成因联系, 来自同源岩浆的演化. 分离结晶是镁铁-超镁铁质岩浆演化的重要组成部分, 瓦吉里塔格辉石岩的Ni含量为 $133 \times 10^{-6} \sim 141 \times 10^{-6}$, 远低于地幔橄榄岩中Ni的丰度 ($250 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$); 辉长岩类岩石中Ni含量为 $9.34 \times 10^{-6} \sim 64.84 \times 10^{-6}$, 变化较大, Cr含量为 $9.76 \times 10^{-6} \sim 23.9 \times 10^{-6}$, 均远低于原始镁铁质岩浆含量 ($\text{Ni}=400 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$, $\text{Cr}=288 \times 10^{-6} \sim 519 \times 10^{-6}$), 指示岩体经历了一定的岩浆演化. 主量元素Harker图解(图3)中, 辉石岩、辉长岩、霓霞正长岩、角闪正长岩的演化趋势, 暗示不同岩石类型可以通过分离结晶作用形成. TiO_2 、 MgO 、 MnO 和 CaO 与 SiO_2 的负相关关系(图3), 指示可能存在橄榄石、单斜辉石和Ti-Fe氧化物的分离结晶. 镁铁-超镁铁质岩类 CaO 、 Ni 、 Al_2O_3 与 MgO 图解(图5)中, 随 MgO 降低 CaO 亦降低, 表明存在单斜辉石的分离结晶, Ni与 MgO 的正相关关系也指示存在橄榄石的分离结晶, Al_2O_3 与 MgO 呈负相关, 表明斜长石的分离结晶并不明显, 与REE球粒陨石标准化图解(图4(a))上并无明显的Eu负异常和微量元素蛛网图(图4(b))中Sr的弱负异常特征一致.

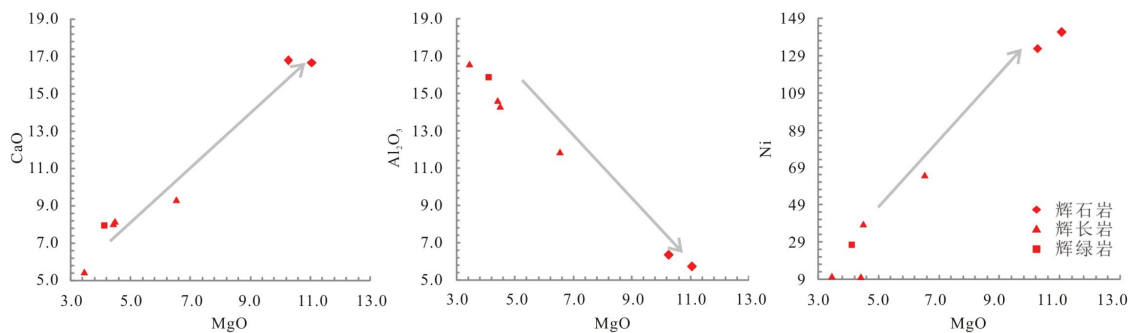


图5 瓦吉里塔格镁铁-超镁铁质岩协变图

通常情况下, 地壳具有低的Nb、Ta和高的Pb含量, 相对富集Th、U等大离子亲石元素, 地壳物质的加入可能使岩石具有Nb、Ta的负异常和Pb的正异常. Th/Ta比值在原始地幔 ($\text{Th}/\text{Ta} \approx 2$) 和地壳 (上地壳 $\text{Th}/\text{Ta} \approx 6.9$, 下地壳 $\text{Th}/\text{Ta} \approx 7.9$) 中有截然不同的数值, 可以作为岩浆是否发生地壳混染的重要指针^[32-33]. 瓦吉里塔格辉石岩、辉长岩类7个样品中, 6个样品Th/Ta比值在2以下, 平均为1.81, 显著区别于地壳Th/Ta比值. 同时辉石岩、辉长岩类在微量元素蛛网图(图4(b))中也未见明显的负异常, 个别样品具有Pb弱的正异常, 故认为瓦吉里塔格镁铁-超镁铁质岩类形成过程中, 没有经历明显的地壳物质混染或受地壳混染作用不明显^[34]. 而霓霞正长岩及角闪正长岩样品, 在微量元素蛛网图(图4(b))中显示具有明显的Nb、Ta负异常和Pb的正异常, 且霓霞正长岩类Th/Ta比值为7.77~9.49, 角闪正长岩类Th/Ta比值为2.42~4.60, 显示霓霞正长岩、角闪正长岩岩体形成过程中可能受到了一定程度的地壳物质混染作用. 因此, 瓦吉里塔格杂岩体在岩浆演化后期, 可能受到了一定程度的同化混染作用.

本次获得样品的微量元素蛛网图(图4(b))与OIB具有一定的相似特征. 辉长岩类构造判别图(图2)也落在板内碱性玄武岩范围内, Nb/La比值主要介于1.20~1.30, 与峨眉山高钛玄武岩推测的地幔柱成分 ($\text{Nb}/\text{La}=1.1 \sim 1.3$) 相似^[29]. Zr/Nb-Ce/Y图解(图6)中, 镁铁质岩类样品多数落在亏损的石榴石橄榄岩区域或边界附近^[35]. 前人对瓦吉里塔格镁铁质岩的岩浆源区开展了同位素研究, 认为镁铁质岩具有适度亏损的Nd、Sr、Pb同位素组成特征, 其Nd、Sr、Pb同位素组成与一些洋岛玄武岩和地幔柱组分相同或相近, 镁铁质岩可能源自亏损型地幔源区^[12,25].

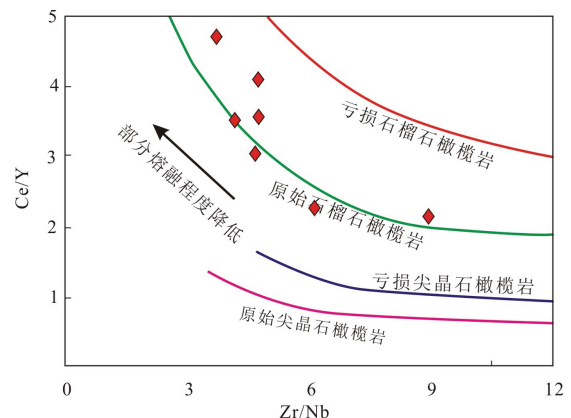


图6 瓦吉里塔格辉长岩类Zr/Nb-Ce/Y图解^[35]

超镁铁-镁铁质岩是瓦吉里塔格杂岩体重要的组成部分. 不同于K、Na等活泼元素, Zr、Hf、Ta等高场强元素在岩石形成和演化过程中具有良好的稳定性, 是判别源区性质和构造环境的良好示踪剂. 瓦吉里塔格地区辉长岩类岩石样品的Nb/La比值为0.91~1.30, 平均值为1.19 (大于1), Hf/Ta平均值为2.89, 均小于5, La/Ta比值为16.6~26.37 (大于15); TiO₂含量平均值为3.70%, Nb含量平均值为76×10⁻⁶ (大于12×10⁻⁶), Ta含量平均值为3.49×10⁻⁶ (大于0.7×10⁻⁶), 与典型板内玄武岩类的元素特征高度一致^[33]. Hf-Th-Ta三角图解(图7(a))中, 辉长岩类样品落在板内玄武岩和P-MORB交界处; Nb-Zr-Y三角图解(图7(b))中, 所有辉长岩类样品全部落入板内碱性玄武岩范围内. 综合判别图解, 瓦吉里塔格地区的杂岩体可能形成于板内伸展环境, 与该地区岩浆岩所处的构造背景一致.

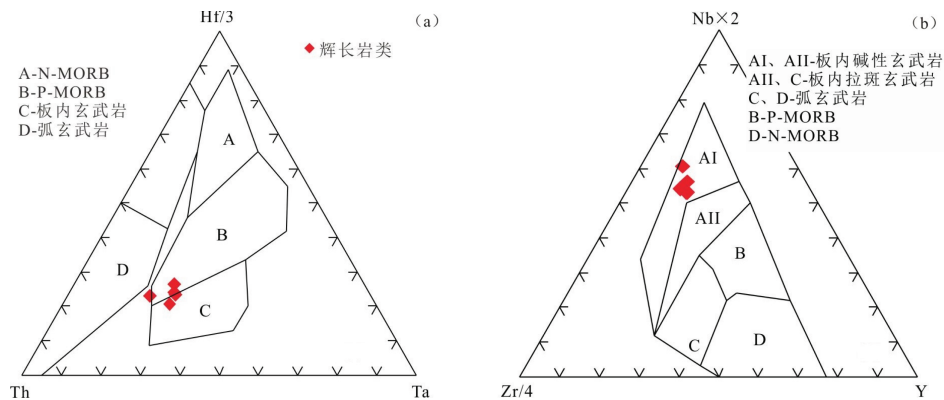


图7 瓦吉里塔格辉长岩类构造环境判别图解

注:(a)为Hf-Th-Ta图解, 据文献^[36]修改; (b)为Nb-Zr-Y图解, 据文献^[37]修改

角闪正长岩、正长岩类成因模式主要有三种: 1) 幔源岩浆和挥发分注入到下地壳底部, 导致下地壳岩石的部分熔融或封闭体系中地壳岩石在加厚大陆地壳压力下部分融入; 2) 可能是同俯冲相关的交代地幔部分熔融, 或碱性玄武岩岩浆分离结晶的产物; 3) 可能是岩浆混合, 特别是幔源基性岩浆和酸性岩浆混合后, 分异的产物或幔源硅不饱和和碱性岩浆和下地壳部分熔融形成的花岗岩岩浆混合的产物^[38]. 一些正长岩类常和碱性镁铁质岩石伴生, 构成连续的演化系列, 碱性岩浆通常被认为形成于伸展构造背景下, 因此, 正长岩类也可能形成于伸展背景下^[39]. 瓦吉里塔格碱性镁铁质岩均具有板内岩浆的特征, 形成于板内拉张环境.

邹天人等获得瓦吉里塔格层状杂岩体锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄为(357.9±6.5) Ma, Sm-Nd等时线年龄为(306±7) Ma, 角闪正长岩年龄为310.1 Ma, 岩脉中微粒闪长岩脉K-Ar年龄为231.3 Ma, 金伯利质煌斑岩中金云母单矿物Ar-Ar坪年龄为252.7 Ma^[12,25]. 部分碳酸岩脉截穿金伯利质煌斑岩, 可能就位时间最晚. 研究认为~250 Ma的超镁铁质-镁铁质-角闪正长岩-正长岩杂岩体, 与研究区北侧的小海子正长岩、超镁铁质岩均形成于板内伸展背景下^[12,25,40], 一系列的岩浆活动暗示塔里木板块北缘在石炭纪-早二叠世为板内伸展环境.

5.2 矿床成因分析

研究区内矿化地质体主要为各类碱性岩体、碱性岩脉等. 铌钽矿化、稀土矿化可能为碱性岩浆演化的结果, 岩体成岩过程与成矿过程基本一致. 通常地幔源区的低度部分熔融会导致稀土元素和大离子亲石元素(Nb、Ta、Zr、Hf、U、Th)等不相容元素的富集, 同时富集F、B、P、CO₂等挥发分构成矿化剂, 对成矿具有重要控制作用^[5,11]. Nb、Ta元素为强不相容元素, 岩浆演化中倾向富集于残余熔体, 伴随岩浆结晶分异作用, 成矿元素富集于晚期霓霞岩、角闪正长岩等岩体、脉体中. 碳酸岩型稀土矿化的形成与上述过程基本一致, 碳酸岩通常来自碳酸盐化地幔物质低程度(小于1%)的部分熔融, 不相容元素REE可能优先进入熔体, 碳酸岩岩浆演化过程中方解石和白云石等碳酸盐矿物结晶分异作用可以引起REE富集成矿, 形成稀土矿物, 随晚期碳酸岩脉富集成矿; 分析结果显示区内岩浆岩类REE含量普遍较高, 但碳酸岩较共生的碱性硅酸岩更富集REE, 作为最晚期侵入的地质体, 碳酸岩岩浆在晚期形成的富含F、CO₂、REE的热液流体, 可能使岩石中稀土元素活化而进一步富集, 形成碳酸岩型稀土矿化.

5.3 成矿潜力及找矿方向分析

根据矿床分类及成矿专属性等可知, 碱性岩体是寻找稀土、稀有矿产的重要目标地质体, 瓦吉里塔格地区位于塔里木盆地北缘, 是塔里木盆地北缘碱性岩带的重要组成部分, 碱性岩带形成于板内伸展构造背景.

表 3 瓦吉里塔格稀土、稀有金属矿区域预测找矿模型综合信息

要素	特征描述	要素类型
构造位置	塔里木中央地块北缘古陆隆起-巴楚凸起(隆起)	必要
区域成矿带	塔里木盆地(中央地块)石油-天然气-煤-U-Pb-Zn-Fe-V-Ti-盐类(钾盐)-砂金Ⅲ级成矿区(中央隆起石油-天然气-Fe-V-Ti成矿带Ⅳ级)	重要
成矿环境	铌钽矿化、稀土矿化可能为碱性岩浆演化的结果,岩体成岩过程与成矿过程基本一致.碱性岩主要形成于板内环境,通常地幔源区的低度部分熔融会导致稀土元素和大离子亲石元素(Nb、Ta、Zr、Hf、U、Th)等不相容元素的富集,同时富集F、B、P、CO ₂ 等挥发分构成矿化剂,对成矿具有重要控制作用. Nb、Ta元素为强不相容元素,岩浆演化中倾向富集于残余熔体,伴随岩浆结晶分异作用,成矿元素富集于晚期霓霞岩、角闪正长岩等岩体、脉体中. 碳酸岩型稀土矿化的形成与上述过程基本一致,碳酸岩通常来自碳酸盐化地幔物质低程度(小于1%)的部分熔融,不相容元素REE可能优先进入熔体,碳酸岩岩浆演化过程中方解石和白云石等碳酸盐矿物结晶分异作用可以引起REE富集成矿,形成稀土矿物,随晚期碳酸岩脉富集成矿;分析结果显示区内岩浆岩类REE含量普遍较高,但碳酸岩共生的碱性硅酸岩更富集REE,作为最晚期侵入的地质体,碳酸岩岩浆在晚期形成的富含F、CO ₂ 、REE的热液流体,可能使岩石中稀土元素活化而进一步富集,形成碳酸岩型稀土矿化	必要
成矿时代	海西期晚期石炭纪(282~357.9 Ma)	必要
成矿地质体特征	主要赋存于各类碱性岩脉及碱性岩株中	必要
矿石组合特征	矿石中主要有用矿物为铌钽矿、含稀土的碳酸岩矿物,脉石矿物以方解石、石英、黏土矿物为主,少许石膏、滑石等矿物	必要
成矿构造或成矿结构面	宏观呈一平缓的穹窿构造;遥感影像显示发育两组线性构造,为北西向和北东向碳酸岩脉稀土矿化及碱性岩类Nb、Ta矿化一般为全脉矿化,脉体、岩体形态即为矿体形态,矿化体通常为板脉状、透镜状. 碳酸岩型铌钽矿脉与稀土矿脉关系密切,共生产出. 一般含矿的碱性脉体略为破碎,不含矿的相对完整. 矿化体顶底板围岩主要为辉石岩、含长辉石岩、(碱性)辉石岩等,部分碱性岩脉矿化体围岩为古生代沉积地层,矿体与围岩分界明显,部分碳酸岩脉围岩因强碳酸岩化也具稀土矿化. 可能受上地幔深大断裂控制;北东向次级断裂或裂隙为晚期热液贯入、富集提供了通道或空间	重要
矿体特征		重要
矿石质量	矿石中有效组分主要为铌钽、稀土	必要
矿石特征	铌钽矿化矿石类型包括碱性岩型及碳酸岩型两大类,具体为霓霞正长岩、正长(斑)岩、霓霞(斑)岩、正长闪长岩及碳酸岩等. 矿石构造包括块状、条带状. 不同的岩石类型其矿物组成各有不同,多种多样. 研究表明火成碳酸岩脉型铌钽矿矿石矿物主要为烧绿石,邹天人等通过电子探针测定也证实碳酸岩型稀土-铌矿中的含铌矿物主要为烧绿石 ^[12,25] . 稀土矿化矿石类型全为碳酸岩型. 矿石构造包括条带状及斑杂状,条带状矿石与斑杂状矿石组合中:条带状矿石多在矿化体中部,少量在边部;脉宽部位中多为斑杂状,脉细者为条带状. 碳酸岩型稀土矿床(化)的主要矿物为铁白云石和方解石,次为天青石和磷灰石,偶有黄铁矿、钾长石等;前人通过电子探针测定稀土矿物主要为独居石 ^[12,25]	必要
次生蚀变	碱性岩类矿化体其围岩主要为镁铁-超镁铁质岩,除局部见钠长石化外,未见明显的蚀变,部分侵入至沉积地层中碱性岩体周围,见硅化、绿泥石化等;碳酸岩矿化体周围多见碳酸岩化、黄钾铁矾次生蚀变	重要
成因类型	碱性岩、碳酸岩型稀土、稀有金属矿(热液型)	必要
地球化学异常	强磁负异常(地层无磁性,钕钽磁铁矿矿体剩磁为主,含磁铁矿的辉石岩也具有较强的剩磁(-2 000~-5 000 nT);与磁铁矿有关负磁异常ΔT大于-5 000 nT)	重要
区域预测模型	成矿地质背景+热液型稀土,稀有金属矿点+石炭纪碱性岩脉及岩株,碳酸岩脉+稀土、稀有金属含矿蚀变带	

岩石地球化学分析显示,瓦吉里塔格杂岩体整体具有较一致的REE配分曲线,岩石的稀土含量较高;基

本分析结果显示,该工作区内霓霞正长岩体、霓霞岩脉、正长岩脉、碳酸岩脉等多种碱性岩体或脉体,均可见Nb、Ta矿化,部分含量甚至可达工业品位;稀土矿化则全部见于碳酸岩脉中。根据含矿碱性岩脉分布特征可知,富含稀土、稀有元素的岩脉分布于杂岩体北端中部,工作区南部以及东西两侧侵入至沉积地层中的正长岩脉等未见明显矿化。地表脉体通常成群(2~10条不等)、平行出现,限于工作程度,本次对同一点位的脉群选1条脉体取样分析,矿化脉体邻近的众多平行分布脉体可能也有较好的含矿性;另外,本次调查工作仅对地表出露的碱性岩及脉体进行调查分析,深部含矿地质体可能具有更大的规模及延伸。邹天人等仅对瓦吉里塔格1条碳酸岩脉进行了地表探槽揭露,样品显示 Nb_2O_5 含量在工业品位以下, P_2O_5 仅少量样品满足工业品位、无法圈出磷矿体,但稀土均在1%以上矿化稳定,以REO平均品位3.464%、推深100 m体中 2.8 g/cm^3 粗略估算,REO储量可达5 678 t^[12,25],但对碱性岩含矿性未作出评价。本次调查分析发现,碳酸岩脉稀土矿体地表长约100~500 m,地表宽度0.5~5.0 m,REO为0.653 4%~1.139 2%,铌钽(Nb+Ta)品位为0.016 4%~0.061 7%,认为具有较好的REE-Nb-Ta找矿潜力及经济价值。因此,区内霓霞正长岩体及其北侧的碱性岩脉体具有较好的寻找碱性岩型Nb、Ta矿床的潜力,而区内碳酸岩脉具有寻找碳酸岩型稀土、Nb、Ta矿床的潜力(表3)。

瓦吉里塔格一带北侧小海子地区同样分布与瓦吉里塔格杂岩体地质背景、岩性组合、岩石类型较为相似的碱性岩体,两个杂岩体相距30 km,中间为第四系覆盖,两者碱性岩体及碱性岩脉均相对发育,岩石组成和地球化学组成相似,为同源岩浆成因^[40],小海子杂岩体可能具有一定的寻找碱性岩型Nb、Ta矿床的潜力。

6 结论

(1) 瓦吉里塔格杂岩体自早到晚(早二叠世末)形成橄榄岩-橄榄辉石岩-辉石岩(含铁)-碱性辉长岩、碱性角闪正长岩、方钠霓霞正长岩组成的杂岩体,后期(晚二叠世-早三叠世)有碳酸岩脉、似金伯利岩(金伯利质煌斑岩)岩筒及煌斑岩脉贯入。

(2) 瓦吉里塔格杂岩体内的辉石岩、辉长岩、角闪正长岩、霓霞正长岩等均属碱性岩系列,具有明显的结晶分异特征,一般发生全岩(脉)Nb-Ta-REE矿化。

(3) 碱性体(脉)的稀土配分曲线基本平行,均表现出LREE略富集、HREE亏损的右倾特征,轻稀土分馏特征较重稀土明显。从辉石岩到辉长岩、再到霓霞正长岩类, Σ REE含量逐渐增高,结合较为一致的微量元素蛛网图曲线(富集大离子亲石元素,相对亏损高场强元素),认为各岩石类型可能为同源演化;岩石成因研究表明,镁铁质岩浆可能源自亏损的地幔源区,演化过程中经历了一定的橄榄石及辉石、钛铁氧化物的分离结晶,岩浆演化后期受到了一定程度的同化混染作用。主体形成于早二叠世-早三叠世的板内伸展构造环境。

(4) 瓦吉里塔格一带碱性岩体中具有较好的碱性岩型稀有(Nb、Ta)矿产找矿前景,其中的碳酸岩(脉)体具有较好的寻找碳酸岩型稀土、Nb、Ta矿的找矿前景。

参考文献:

- [1] 姜常义,张蓬勃,卢登蓉,等.柯坪玄武岩的岩石学、地球化学、Nd、Sr、Pb同位素组成与岩石成因[J].地质论评,2004,50(5):492-500.
JIANG C Y, ZHANG P B, LU D R, et al. Petrology, geochemistry and petrogenesis of the Kalpin basalts and their Nd, Sr and Pb isotopic compositions[J]. Geological Review, 2004, 50(5): 492-500. (in Chinese)
- [2] QIN K Z, SU B X, SAKYI P A, et al. SIMS zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu-bearing mafic-ultramafic intrusions in Eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim Basin (NW China): Constraints on a ca. 280 Ma mantle plume[J]. American Journal of Science, 2011, 311(3): 237-260.
- [3] CAO J, WANG C Y, XING C M, et al. Origin of the Early Permian Wajilitag igneous complex and associated Fe-Ti oxide mineralization in the Tarim Large Igneous Province, NW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 84: 51-68.
- [4] 厉子龙,励音骐,邹思远,等.塔里木早二叠世大火成岩省的时空特征和岩浆动力学[J].矿物岩石地球化学通报,2017,36(3):418-431+358.
LI Z L, LI Y Q, ZOU S Y, et al. The temporospatial characteristics and magma dynamics of the Early Permian Tarim Large Igneous Province[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2017, 36(3): 418-431+358. (in Chinese)
- [5] CHENG Z G, ZHANG Z C, AIBAI A, et al. The role of magmatic and post-magmatic hydrothermal processes on rare-earth element mineralization: A study of the Bachu carbonatites from the Tarim Large Igneous Province, NW China[J]. Lithos, 2018, 314: 71-87.

- [6] THOMPSON R N, GIBSON S A. Magmatic expression of lithospheric thinning across continental rifts[J]. *Tectonophysics*, 1994, 233(1): 41-68.
- [7] WILSON M, DOWNES H, CEBRIÁ J M. Contrasting fractionation trends in coexisting continental alkaline magma series; Cantal, Massif Central, France[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36(6): 1729-1753.
- [8] XU C, CAMPBELL I H, ALLEN C M, et al. U-Pb zircon age, geochemical and isotopic characteristics of carbonatite and syenite complexes from the Shaxiongdong, China[J]. *Lithos*, 2008, 105(1/2): 118-128.
- [9] YANG J H, SUN J F, ZHANG M, et al. Petrogenesis of silica-saturated and silica-undersaturated syenites in the northern North China Craton related to post-collisional and intraplate extension[J]. *Chemical Geology*, 2012, 328: 149-167.
- [10] ZHU Y S, YANG J H, SUN J F, et al. Zircon Hf-O isotope evidence for recycled oceanic and continental crust in the sources of alkaline rocks[J]. *Geology*, 2017, 45(5): 407-410.
- [11] BEARD C D, GOODENOUGH K M, BORST A M, et al. Alkaline-silicate REE-HFSE systems[J]. *Economic Geology*, 2023, 118(1): 177-208.
- [12] 邹天人, 李庆昌. 中国新疆稀有及稀土金属矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
ZOU T R, LI Q C. Rare and rare earth metallic deposits in Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006. (in Chinese)
- [13] 袁忠信, 李建康, 王登红, 等. 中国稀土矿床成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
YUAN Z X, LI J K, WANG D H, et al. Metallogenic regularity of REE ore deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012. (in Chinese)
- [14] 谢明材, 苏本勋, 王忠梅, 等. 塔里木北缘与碱性岩有关的稀有-稀土矿床成矿作用研究[J]. *地质科学*, 2020, 55(2): 420-438.
XIE M C, SU B X, WANG Z M, et al. Research on the characteristics of rare and rare earth deposits associated with alkaline rocks in the northern margin of Tarim, Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2020, 55(2): 420-438. (in Chinese)
- [15] 刘春花, 吴才来, 郗源红, 等. 南天山拜城县波孜果尔A型花岗岩类锆石U-Pb定年及其Lu-Hf同位素组成[J]. *岩石学报*, 2014, 30(6): 1595-1614.
LIU C H, WU C L, GAO Y H, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and Lu-Hf isotopic system of A-type granitoids in South Tianshan, Baicheng County, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(6): 1595-1614. (in Chinese)
- [16] 杨树锋, 陈汉林, 厉子龙, 等. 塔里木早二叠世大火成岩省[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(2): 187-199.
YANG S F, CHEN H L, LI Z L, et al. Early Permian Tarim Large Igneous Province in northwest China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(2): 187-199. (in Chinese)
- [17] HAN Y G, ZHAO G C, CAWOOD P A, et al. Plume-modified collision orogeny: The Tarim-western Tianshan example in Central Asia[J]. *Geology*, 2019, 47(10): 1001-1005.
- [18] 孙政浩, 秦克章, 毛亚晶, 等. 塔里木北缘波孜果尔碱性(花岗岩)岩铌-钽-锆-铷-稀土矿床钠铁闪石、霓石特征及意义[J]. *岩石学报*, 2021, 37(12): 3687-3711.
SUN Z H, QIN K Z, MAO Y J, et al. Characteristics and significance of aegirine and arfvedsonite in Boziguoer Nb-Ta-Zr-Rb-REE deposit related to alkaline granite, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(12): 3687-3711. (in Chinese)
- [19] XIAO W J, WINDLEY B F, ALLEN M B, et al. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1316-1341.
- [20] 黄河, 张东阳, 张招崇, 等. 南天山川乌鲁碱性杂岩体的岩石学和地球化学特征及其岩石成因[J]. *岩石学报*, 2010, 26(3): 947-962.
HUANG H, ZHANG D Y, ZHANG Z C, et al. Petrology and geochemistry of the Chuanwulu alkaline complex in South Tianshan: Constraints on petrogenesis and tectonic setting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(3): 947-962. (in Chinese)
- [21] HUANG H, ZHANG Z C, SANTOSH M, et al. Geochronology, geochemistry and metallogenic implications of the Boziguo'er rare metal-bearing peralkaline granitic intrusion in South Tianshan, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 61: 157-174.
- [22] ZHANG C L, LI Z X, LI X H, et al. A Permian Large Igneous Province in Tarim and Central Asian orogenic belt, NW China: Results of a ca. 275 Ma mantle plume?[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2010, 122(11/12): 2020-2040.
- [23] ZHOU M F, ZHAO J H, JIANG C Y, et al. OIB-like, heterogeneous mantle sources of Permian basaltic magmatism in the western Tarim Basin, NW China: Implications for a possible Permian Large Igneous Province[J]. *Lithos*, 2009, 113(3/4): 583-594.
- [24] 张师本, 高琴琴, 黄智斌, 等. 塔里木盆地东部地区晚奥陶世碎屑岩地层划分与对比[C]//中国古生物学会第十次全国会员代表大会暨第25届学术年会: 纪念中国古生物学会成立80周年论文摘要集. 南京, 2009: 84-85.

- ZHANG S B, GAO Q Q, HUANG Z B, et al. Stratigraphic division and correlation of Late Ordovician clastic rocks in eastern Tarim Basin[C]//The 10th National Congress of Palaeontological Society of China (PSC) and the 25th Annual Conference of PSC: Abstract Volume of Papers Commemorating the 80th Anniversary of the Founding of PSC. Nanjing, 2009: 84-85. (in Chinese)
- [25] 邹天人, 徐珏, 陈伟十, 等. 塔里木盆地北缘碱性岩型稀有稀土矿床[J]. 矿床地质, 2002, 21(S1): 845-848.
ZOU T R, XU J, CHEN W S, et al. Rare and rare earth mineral deposits related to alkaline rocks on northern margin of Tarim Basin, Xinjiang, China[J]. Mineral Deposits, 2002, 21(S1): 845-848. (in Chinese)
- [26] CHEN F, HEGNER E, TODT W. Zircon ages and Nd isotopic and chemical compositions of orthogneisses from the Black Forest, Germany: Evidence for a Cambrian magmatic arc[J]. International Journal of Earth Sciences, 2000, 88(4): 791-802.
- [27] CHEN F, SIEBEL W, SATIR M, et al. Geochronology of the Karadere basement (NW Turkey) and implications for the geological evolution of the Istanbul zone[J]. International Journal of Earth Sciences, 2002, 91(3): 469-481.
- [28] WILSON M. Igneous petrogenesis[M]. London: Unwin Hyman, 1989.
- [29] MAITRE L. A classification of igneous rocks and glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1989.
- [30] BOYNTON W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[M]//Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-114.
- [31] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [32] 王焰, 邢长明. 峨眉山大火成岩省二滩高钛玄武岩和白马层状岩体中单斜辉石的成分特征及其成因指示[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2018, 37(6): 1019-1034.
WANG Y, XING C M. Compositions of clinopyroxenes from the Ertan high-Ti basalt and Baima layered intrusion of the Emeishan Large Igneous Province: Implication for a genetic link of the high-Ti basalt and layered intrusion[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2018, 37(6): 1019-1034. (in Chinese)
- [33] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: Its composition and evolution[J]. The Journal of Geology, 1986, 94(4): 57-72.
- [34] HOFMANN A W, JOCHUM K P, SEUFERT M, et al. Nb and Pb in oceanic basalts: New constraints on mantle evolution[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1986, 79(1/2): 33-45.
- [35] CONDIE K C. High field strength element ratios in Archean basalts: A window to evolving sources of mantle plumes?[J]. Lithos, 2005, 79(3/4): 491-504.
- [36] WOOD D A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1980, 50(1): 11-30.
- [37] MESCHÉDE M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. Chemical Geology, 1986, 56(3/4): 207-218.
- [38] HU J, JIANG N, GUO J H, et al. The role of basaltic underplating in the evolution of the lower continental crust[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2020, 275: 19-35.
- [39] 孙林华, 王岳军, 范蔚茗, 等. 再论巴楚麻扎山正长岩体岩石成因和构造意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(1): 8-20.
SUN L H, WANG Y J, FAN W M, et al. A further discussion of the petrogenesis and tectonic implication of the Mazhashan syenites in the Bachu area[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2008, 38(1): 8-20. (in Chinese)
- [40] 李立兴, 陈懋弘, 李厚民, 等. 新疆巴楚小海子岩体铁钛成矿特征及资源利用前景[J]. 矿床地质, 2024, 43(1): 29-42.
LI L X, CHEN M H, LI H M, et al. Iron-titanium metallogenic characteristics and resource utilization prospect of Xiaohaizi intrusion in Bachu area, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2024, 43(1): 29-42. (in Chinese)