

新疆拜城波孜果尔碱性岩中副矿物的特征*

尹京武¹, 邵兴坤¹, 杨海涛¹, 朴庭贤¹, 徐海明², 王 军²

(1 中国地质大学科学研究院地学实验中心, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要 在野外地质调查的基础上, 结合室内显微镜观察及电子探针分析测试, 对新疆拜城波孜果尔碱性岩中的副矿物的矿物学特征和化学成分进行了研究。发现这些副矿物常以共生组合的形式产在碱性岩中, 主要分布在石英二长闪长岩和石英二长岩中。烧绿石中 U、Th 和 REE 替代 Ca、Na。独居石富含 LREE, Th 和 LREE 相互替代; 根据独居石中 $w(\text{La} + \text{Ce}) > 40\%$ 和 La/Nd 比值在 1.6~4.5, 推断独居石为热液成因。磷钇矿中富含 REE, 且以 HREE 为主; $w(\text{Th}) > w(\text{U})$ 。锆石中 Zr/Hf 比值在 60% 以上, 符合碱性岩特征, 其 Th/U 比值为 0.6, 属于岩浆锆石。星叶石中 $w(\text{Rb}_2\text{O})$ 、 $w(\text{Cs}_2\text{O})$ 较高。萤石中 Y、Ce 替代 Ca。锆石中的钍石 $w(\text{U})$ 明显高于磁铁矿中钍石 $w(\text{U})$ 。在石英二长岩中, 烧绿石的 $w(\text{CaO})$ 、 $w(\text{TiO}_2)$ 、 $w(\text{ZrO}_2)$ 、 $w(\text{U}_3\text{O}_8)$, 磷钇矿的 $w(\text{Y}_2\text{O}_3)$, 星叶石的 $w(\text{TiO}_2)$, 萤石的 $w(\text{Ca})$, 氟碳铈镧矿的 $w(\text{CaO})$ 较丰富, 而在石英二长闪长岩中, 烧绿石的 $w(\text{Ce}_2\text{O}_3)$, 磷钇矿的 REE 含量, 星叶石的 $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 、 $w(\text{Rb}_2\text{O})$, 萤石 $w(\text{Ce})$ 、 $w(\text{Y})$ 和氟碳铈镧矿的 $w(\text{La}_2\text{O}_3)$ 较高。

关键词 地质学 碱性花岗岩 REE 副矿物 矿物学特征 化学成分 波孜果尔

中图分类号: P575

文献标志码: A

Radioactive mineral characteristics of Boziguoer alkaline rocks in Baicheng, Xinjiang

YIN JingWu¹, SHAO XingKun¹, YANG HaiTao¹, PIAO TingXian¹, XU HaiMing² and WANG Jun²

(1 Geological Lab Center, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

Trace elements, REE and radioactive mineral characteristics and chemical composition of Boziuoer alkali granite in Baicheng of Xinjiang were studied by means of field survey, microscopic observation and electron microprobe analysis (EPMA). Trace elements, REE and radioactive ores are distributed in alkali rocks, especially in quartz-diorites and quartz monzonite, Ca, Na are replaced by U, Th, and Nb is replaced by Ti in pyrochlore. Monazite is rich in LREE, Th, and LREE are replaced by each other. According to the data that $\text{La} + \text{Ce} > 40\%$ and the ratio of La/Nd is between 1.6 and 4.5, the authors infer that the monazite is related to the hydrothermal activity. Xenotime is rich in REE, mainly HREE. The content of Th is higher than that of U. The Zr/Hf ratio is higher than 60%, which is consistent with features of alkaline granite. The ratio of Th/U is 0.6, Th/U > 0.4, suggesting that the zircons belong to magmatic type. Rb_2O and Cs_2O are concentrated in astrophyllite. Ca is replaced by Y and Ce in fluorite. The content of U of thorite distributed in zircon is higher than that of thorite distributed in magnetite. In quartz monzonite, CaO, TiO_2 , ZrO_2 , U_3O_8 in pyrochlore, Y_2O_3 in xenotime, TiO_2 in astrophyllite, Ca in fluorite and CaO in bastnaesite are comparatively high in content. In

* 本文得到中国地质科学院矿产资源研究所委托项目资助

第一作者简介 尹京武, 男, 1958 年生, 副教授, 现主要从事矿床学及矿床地球化学等方面的研究。Email: yinjingwu@cugb.edu.cn

收稿日期 2011-05-30; 改回日期 2012-11-10。张绮玲编辑。

quartz-diorites, Ce_2O_3 in pyrochlore, REE in xenotime, Nb_2O_5 , Rb_2O in astrophyllite, Ce, Y in fluorite and La_2O_3 in bastnaesite are also relatively high in content.

Key words: geology, alkali granite, REE, trace element, mineralogical characteristics, chemical composition, Boziguor

塔里木地块北缘(含天山造山带)是一条重要的稀有、稀土金属成矿带(袁忠信等, 2001; 邹天人等, 2004), 新疆拜城波孜果尔矿床位于这一成矿带上。受自然和交通条件的制约, 目前该区的地质矿产研究程度较低。地勘单位曾对这里进行过多项地质调查和矿产评价工作, 并取得了一些研究成果。前人对该区的研究主要基于构造背景、岩石学特征、岩体产状和地层等方面(陈富文等, 2002; 刘楚雄等, 2004)。邹天人等(2002)对区内碱性岩及其有关的成矿作用也进行了研究。

但是, 目前对于本区主要含矿岩体碱性岩岩株中含稀有、稀土元素和放射性元素的副矿物的矿物特征和化学成分研究较少, 这在一定程度上影响了对该区成岩成矿过程的认识。本文在前人研究成果的基础上, 通过野外地质调查, 并结合室内显微镜观察和电子探针测试, 对本区碱性岩中副矿物的矿物学特征和化学成分进行了研究。

1 区域地质背景

研究区位于塔里木盆地北缘天山山脉西段哈里克套山南坡, 距拜城县城正北直线距离约 43 km, 地理坐标为东经 $81^{\circ}52'30''\sim 81^{\circ}56'00''$, 北纬 $42^{\circ}12'30''\sim 42^{\circ}14'30''$ (图 1)。大地构造上属于塔里木-华北板块, 塔里木微板块之东阿莱-哈尔克古生代复合沟弧带。

波孜果尔碱性岩岩体产出志留系穷库什太组地层中(图 1), 侵入于穷库什太组的大理岩中。产出时间为华力西晚期, 产状为小岩株, 近东西向分布, 长约 4.45 km, 南北宽 0.4~1.2 km, 平均约 0.8 km, 面积约 3.56 km^2 。岩性主要为石英二长闪长岩, 花岗闪长岩和石英二长岩(图 2)。

该区域的地层分布如图 1 所示。阿克牙依利亚克塔格断裂以北地区主要为志留系, 岩性为大理岩、灰岩、石英片岩、混合岩和变质粉砂岩等, 呈近东西向展布, 出露面积约 70 km^2 , 产状倾向北, 倾角约 $40\sim 70^{\circ}$ 。断裂以南地区出露地层为石炭系干草湖组, 岩性为浅海-滨海相碳酸盐岩及碎屑岩建造, 呈近东西向展布, 出露面积约 50 km^2 , 总体倾向北, 倾角 40

$\sim 70^{\circ}$ 。在西南部零星出露二叠系小提坎立克组地层, 岩性为酸性熔岩、凝灰岩及碎屑岩建造, 呈北西向展布, 出露面积不足 0.1 km^2 。侏罗系—第三系主要为泥岩、粉砂岩、页岩、砾岩、粗砂岩等沉积岩系, 均呈东西向展布。第四系洪积层出露于区内南部地区。

区内主要构造有近东西向、NEE 向和 NE 向 3 组断裂, 以近东西向一组断裂为主, 在区内横贯东西两侧, 是一条长达 160 km 以上的区域性大断裂, 称为阿克牙依利亚克塔格断裂。一般呈复合、分岔, 舒缓波状分布, 断层面产状倾向北, 倾角 70° 左右, 断层性质为压性断层, 并有多期次活动的特点。

2 碱性岩地质特征

含矿岩体主要是华力西晚期侵入的碱性岩岩株, 按岩性分为石英二长闪长岩、花岗闪长岩和石英二长岩(图 2)。岩体呈椭圆岩株状侵入于志留系穷库什太组的大理岩中, 西侧通过 F3 断层与志留系大理岩接触, 南侧侵入志留系大理岩中, 东侧以 F2 断层与黑云母花岗岩接触(图 3)。全岩矿化, 其中以 Nb、Ta 矿化为主, 并伴有 Rb、Cs、Zr、U、Th 和 REE 矿化。总体走向为 295° , 倾向为 NNE 向, 倾角 70° 左右。矿体出露最高为研究区中部, 标高 4159 m, 最低标高位于研究区东北部, 标高 3670 m, 相对高差 489 m, 含矿岩体出露东西长 0.8~1.1 km, 南北宽 0.50~1.1 km, 面积约 1 km^2 。

岩体周围出露 F1、F2 和 F3 三个断层(图 3)。F1 断层发育在南部, 为逆断层, 切穿了志留系穷库什太组大理岩、黑云母花岗岩, 断层带宽 40~90 m, 由 3 条以上的小断裂组成, 断层总体走向 NWW, 倾向 10° , 倾角 $45\sim 70^{\circ}$ 。F2 断层发育在东部霓石花岗岩和黑云母花岗岩接触带上, 为张性断层, 走向 NNE 向, 倾向 100° , 倾角 $70\sim 80^{\circ}$, 断层边部发育与断层平行的裂隙。F3 断层发育在西部, 为逆断层, 切穿了志留系穷库什太组大理岩、霓石花岗岩, 断层带宽 10~15 m, 断层总体走向 NWW 向, 倾向 70° , 倾角 $65\sim 70^{\circ}$ 。

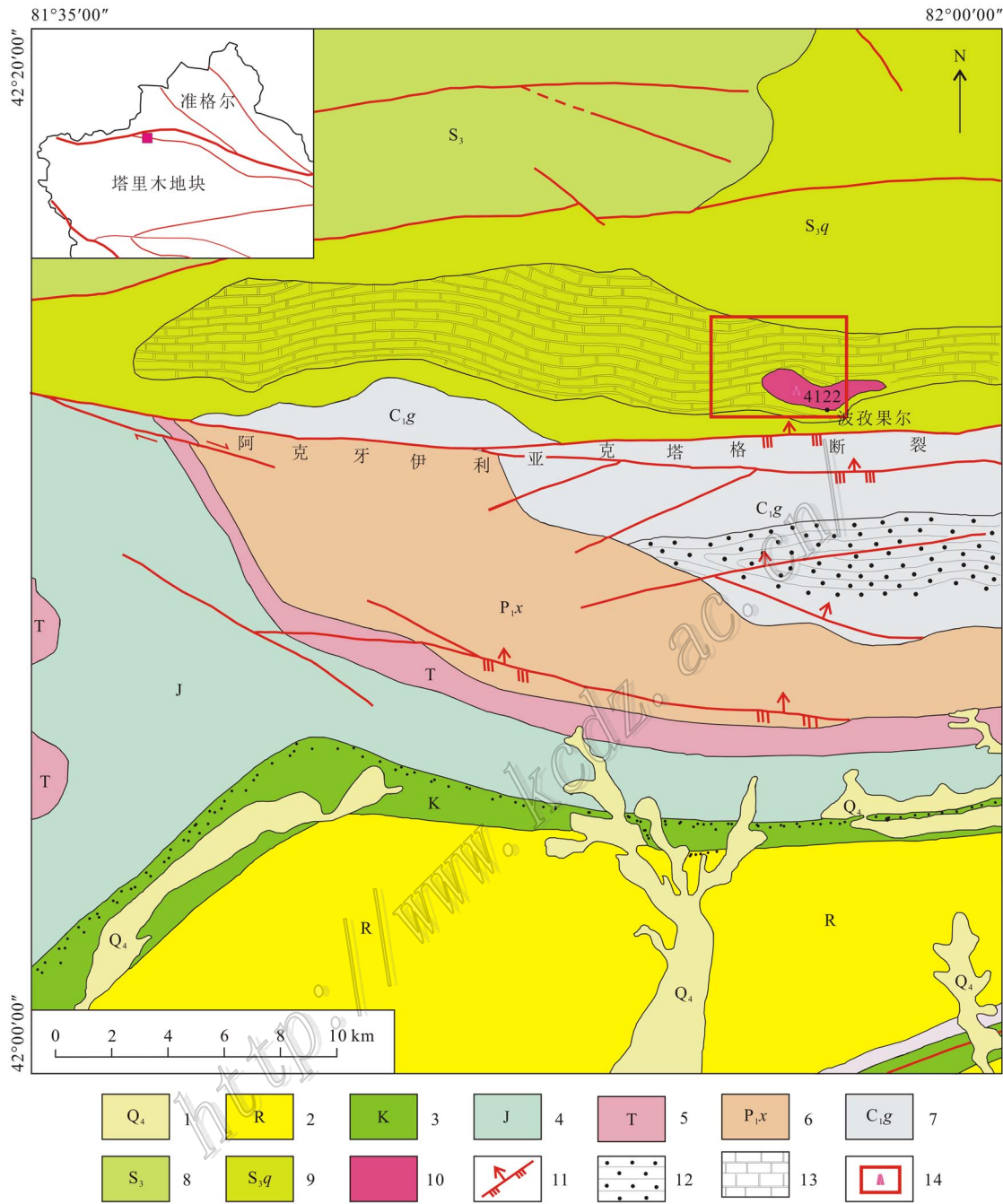


图 1 波孜果尔一带区域地质图

1—第四系洪积层；2—第三系砾岩、砂砾岩、砂岩、泥岩；3—白垩系砂质泥岩、粉砂岩、长英质砂岩、砾岩；4—侏罗系泥岩、泥质粉砂岩、泥质页岩、泥灰岩、砂岩、碳质页岩、石英砂岩、粉砂岩、砾岩、粗砂岩、煤层；5—三叠系砾岩、中粒砂岩、泥质粉砂岩夹粗砂岩、细砾岩；6—二叠系小提坎立克组酸性熔岩、凝灰岩及碎屑岩建造；7—石炭系干草湖组浅海-滨海相碳酸盐岩及碎屑岩建造；8—志留系大理岩、灰岩、石英片岩、混合岩、变质粉砂岩；9—志留系穷库什太组片理化泥质粉砂岩、大理岩、结晶灰岩、绢云母石英片岩、安山玢岩、辉绿岩、英安斑岩；10—华力西晚期碱性岩；11—断层；12—砾岩；13—大理岩；14—研究区

Fig. 1 Regional geological map of Boziguoer area

1—Quaternary diluvial layer; 2—Tertiary conglomerate, glutenite, sandstone and mudstone; 3—Cretaceous sandy mudstone, siltstone, felsic sandstone and conglomerate; 4—Jurassic mudstone, argillaceous siltstone, argillaceous shale, marl, sandstone, carbonaceous shale, quartz sandstone, siltstone, conglomerate, gritstone and coalbed; 5—Triassic conglomerate, medium-grained sandstone, argillaceous siltstone intercalated with gritstone and conglomerates; 6—Permian Xiaotikanlike Formation: acidic lava, tuff and clastic rock; 7—Carboniferous Gancaohu Formation: shallow and marine carbonate; 8—Silurian marble, limestone, quartz schist, migmatite and metamorphic siltstone; 9—Silurian Qiongkushitai Formation: schistose argillaceous siltstone, marble, crystalline limestone, sericite quartz schist, andesitic porphyry, diabase and dacite porphyry; 10—Late Variscan alkali granites; 11—Fault; 12—Conglomerate; 13—Marble; 14—Study area

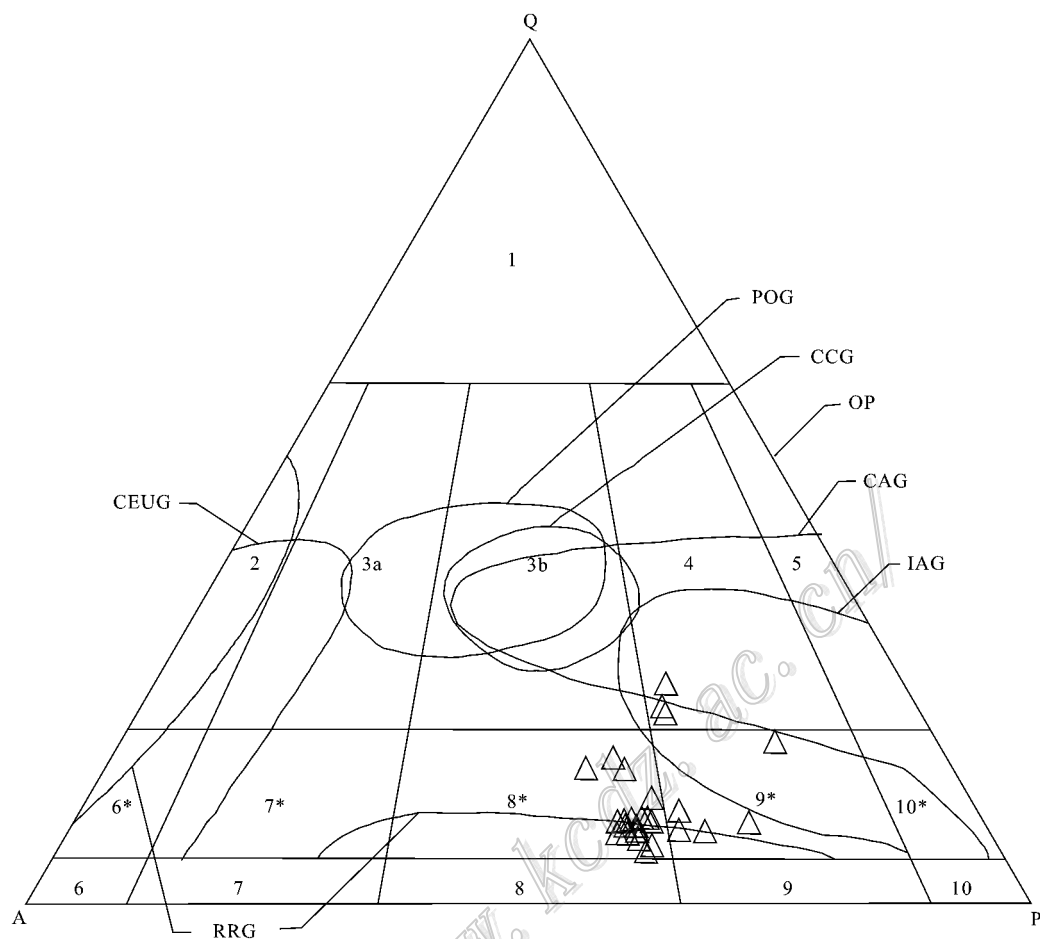


图 2 波孜果尔碱性岩 Q-A-P 图解(刘春花, 2011)

1—富石英花岗岩; 2—碱长花岗岩; 3—花岗岩; 3a—正长花岗岩或普通花岗岩; 3b—二长花岗岩; 4—花岗闪长岩; 5—英云闪长岩; 6*—石英碱长正长岩; 7*—石英正长岩; 8*—石英二长岩; 9*—石英二长闪长岩/石英二长辉长岩; 10*—石英闪长岩/石英辉长岩/石英斜长岩; 6—碱长正长岩; 7—正长岩; 8—二长岩; 9—二长闪长岩/二长辉长岩; 10—闪长岩/辉长岩/斜长岩; IAG= 岛弧花岗岩类; CAG= 大陆弧花岗岩类; CCG= 大陆碰撞花岗岩类; POG= 后造山花岗岩类; RRG= 与裂谷有关的花岗岩类; CEUG= 与大陆的造陆抬升有关的花岗岩类; OP= 大洋斜长花岗岩

Fig. 2 Q-A-P diagram of Boziguoer alkali rocks (after Liu, 2011)

1—Quartz-rich granite; 2—Alkali-feldspar granite; 3—Granite; 3a—Syenogranite; 3b—Monzogranite; 4—Granodiorite; 5—Tonalite; 6*—Quartz alkali feldspar syenite; 7*—Quartz syenite; 8*—Quartz monzonite; 9*—Quartz-monzodiorites/quartz monzogabbro; 10*—Quartz diorite/quartz gabbro/quartz anorthosite; 6—Alkali-feldspar syenite; 7—Syenite; 8—Monzonite; 9—Monzodiorites/monzonite gabbro; 10—Diorite/gabbro/anorthosite; IAG= Island arc granitoids; CAG= Continental arc granitoids; CCG= Continental collision granitoids; POG= Post-orogenic granitoids; RRG= Rift-related granitoids; CEUG= Continent epeirogenic uplift granitoids; OP= Ocean plagiogranite

岩体周围地层为志留系穷库什太组地层, 岩性主要为大理岩、硅化角砾岩、绢云黑云石英片岩和片理化泥质粉砂岩。大理岩位于侵入岩的西部, 出露宽度 140~570 m, 倾向 7°左右, 倾角 50°左右, 为灰白色大理岩。硅化角砾岩位于研究区南部, 出露宽度 130~620 m, 北与大理岩及黑云母花岗岩带呈断层接触, 地层呈近东西向延伸, 倾向 360~10°, 倾角 40°左右。绢云黑云石英片岩位于侵入岩北侧一带, 出露宽 110~500 m, 倾向 7°左右, 倾角 70°左右, 偶夹黑云石英微晶片岩、结晶灰岩。片理化泥质粉砂

岩分布于研究区南侧一带, 出露宽度 130~620 m, 呈近东西向延伸, 倾向 360~10°, 倾角 40°左右, 由于受后期构造作用的影响, 局部地层产状有一定的变化。

3 分析方法

本次研究样品主要采自华力西晚期侵入的碱性岩中, 采样地点如图 3 所示。经显微镜观察, 确定了碱性岩的矿物组成, 主矿物为斜长石、钾长石、钠铁闪石、霓石、黑云母和石英, 副矿物为烧绿石、独居石、

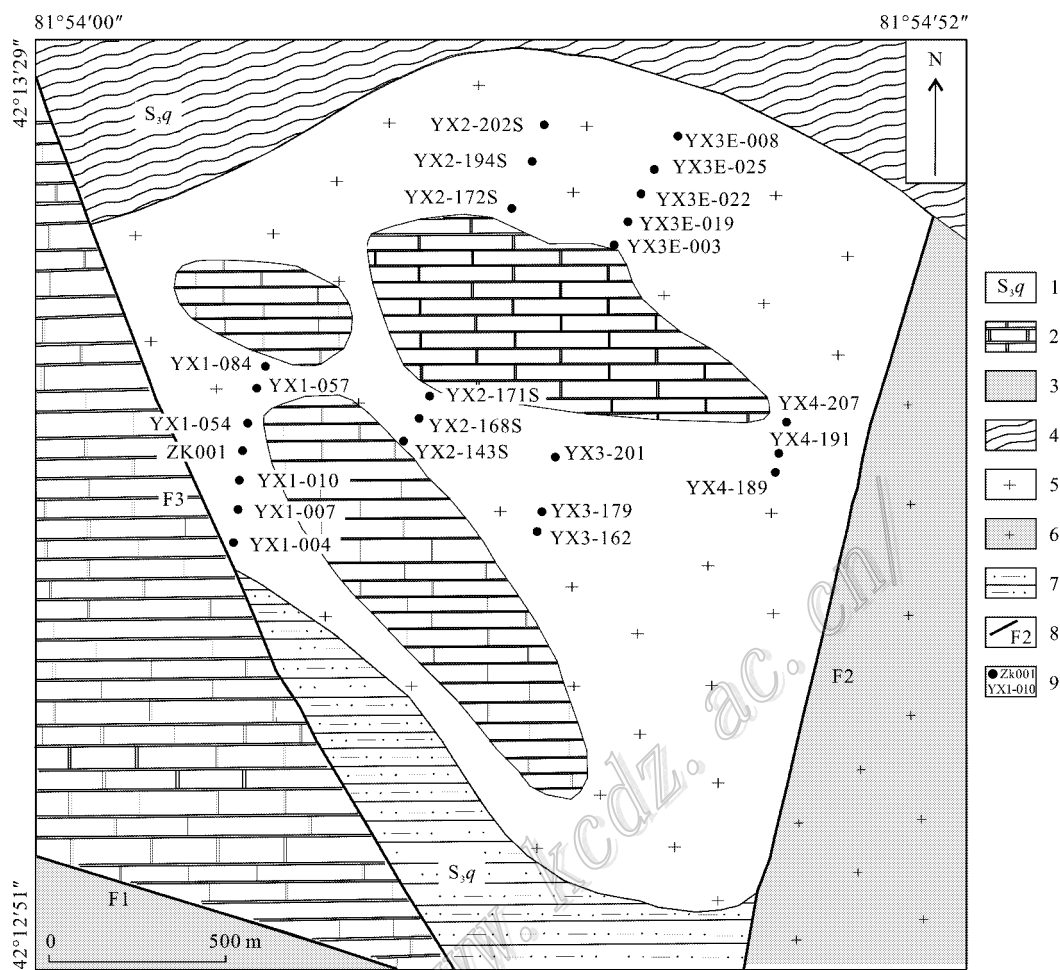


图 3 波孜果尔地质示意图及采样地点图

1—志留统的穷库什太组；2—大理岩；3—硅化角砾岩；4—绢云黑云石英片岩；5—霞石花岗岩；6—碱性黑云母花岗岩；7—片理化泥质粉砂岩；8—断层；9—采样位置

Fig. 3 Geological sketch map of Boziguoer, showing sampling sites

1—Silurian Qiongkushitai Formation；2—Marble；3—Silicified breccia；4—Sericite biotite-quartz schist；5—Aegirine granite；6—Alkaline biotite granite；7—Schistose argillaceous siltstone；8—Fault；9—Sampling location

磷钇矿、锆石、星叶石、萤石、钽石和氟碳铈镧矿。本次研究主要对上述副矿物进行了成分分析。电子探针测试在中国地质大学(北京)电子探针实验室完成,仪器型号为日本岛津公司生产的 EPMA-1600；测试条件为加速电压 15 kV,激发电流 10 nA,电子束直径 1 μm,ZAF 法修正。分析标样采用磁铁矿(Fe)、钠长石(Si、Na、Al)、磷灰石(Ca、P)、金红石(Ti)、蔷薇辉石(Mn)、透长石(K)、橄榄石(Mg)、萤石(F)、独居石(La、Ce、Pr、Nd、Th)、锆石(Y、Zr、Hf)、铯榴石(Rb、Cs)、单矿物(U、Ta、Nb)等。主元素(质量分数>20%)的允许的相对误差≤5%,质量分数在 3%~20% 之间的元素允许的相对误差≤10%,质量分数在 1%~3% 的元素允许的相对误差

≤30%,而质量分数在 0.5%~1% 之间的元素允许的相对误差<50%。

4 副矿物特征

4.1 烧绿石

多呈八面体晶形,不规则粒状集合体;具不完全解理,单偏光下呈黄色、暗红色、红褐色,正极高突起,全消光,正延性,粒径主要集中在 70~140 μm。烧绿石主要在石英二长岩和石英二长闪长岩中产出,尤其在后者产出较多。在石英二长闪长岩中,它常分布于钾长石中,与氟碳铈镧矿、萤石等矿物形成共生组合,伴生矿物为磁铁矿(图 4a)。

4.2 独居石

呈亮黄色、褐色、棕色,多色性微弱:Ng—浅绿黄,Nm—暗绿,Np—亮黄色;多数呈自形板状或柱状,少数呈半自形粒状,高突起,粒径主要集中在30~75 μm ;主要在石英二长岩中产出。独居石常分布于黑云母、钾长石、钠长石、霓石等矿物中,与氟碳铈镧矿等矿物共生(图4b、4f)。

4.3 磷钇矿

呈黄褐色、灰色;多数呈半自形短柱状或粒状,正高-极高突起;平行消光,正延性。粒径主要集中在10~30 μm ,少数呈单矿物充填于脉石矿物颗粒间。主要在石英二长闪长岩和石英二长岩中产出,在后者中产出较多。在石英二长闪长岩中,磷钇矿、

锆石、萤石、氟碳铈镧矿、钍石等副矿物常形成共生组合(图4d);在石英二长岩中,磷钇矿与独居石、菱铁矿、星叶石、氟碳铈镧矿等矿物共生(图4f)。

4.4 锆石

无色、肉红色,多数呈自形半透明四方锥状,柱状,少数呈半自形粒状,粒径主要集中在100~180 μm ,常呈单矿物充填于脉石矿物颗粒间。是矿床中分布较广泛的一种矿物,在石英二长闪长岩和石英二长岩中产出,其中后者中较多。在石英二长岩中,锆石常分布于钠闪石和钠长石间,与氟碳铈镧矿、星叶石、萤石、钍石等共生(图4c);在石英二长闪长岩中,锆石与磷钇矿、萤石、氟碳铈镧矿、钍石等形成共生组合(图4d)。

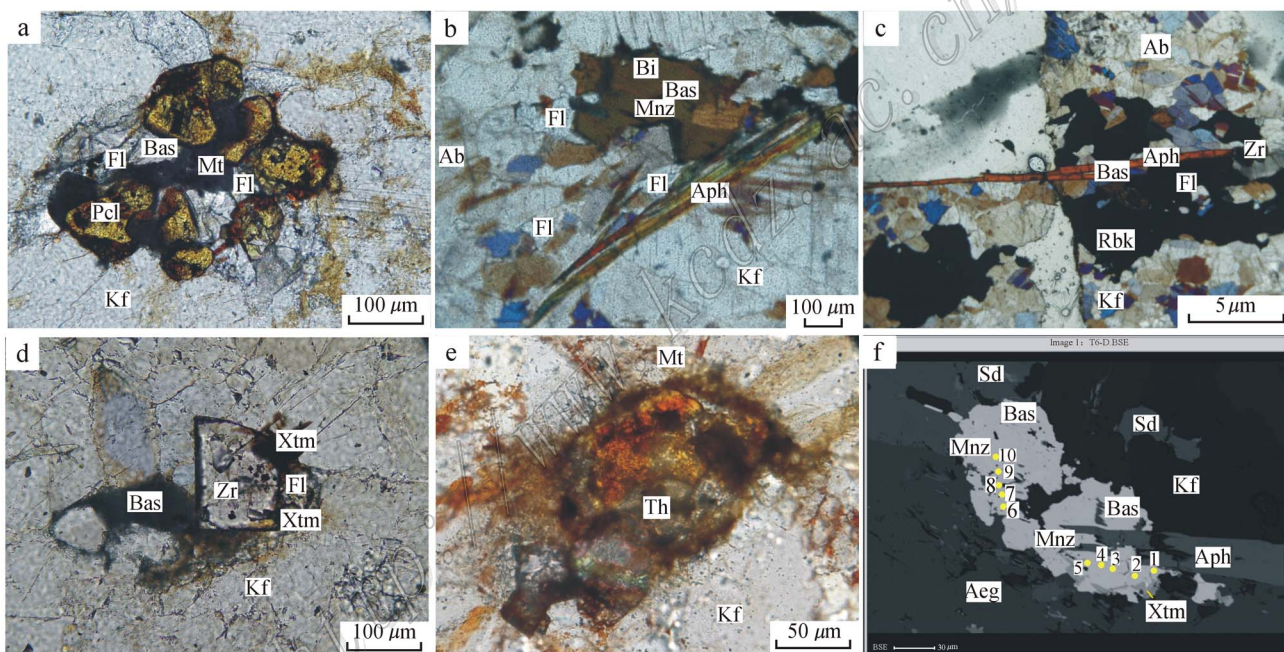


图4 波孜果尔碱性岩显微镜和背散射照片

a. 在石英二长闪长岩中烧绿石(Pcl)呈黄色不规则粒状集合体产出,并与萤石(Fl),磁铁矿(Mt),氟碳铈镧矿(Bas)和钾长石(Kf)分布在一起; b. 石英二长岩中,星叶石(Aph),萤石,氟碳铈镧矿,独居石(Mnz),黑云母(Bi),钾长石,钠长石(Ab)分布在一起; c. 在石英二长岩中,锆石(Zr)、氟碳铈镧矿、星叶石、钠闪石(Rbk)、钠长石、萤石等赋存在一起; d. 石英二长闪长岩中,细小粒状氟碳铈镧矿集合体,四方锥状锆石,短柱状磷钇矿(Xtm)和萤石共生,钍石(Th)呈细小粒状分布在锆石中,这些副矿物形成共生组合; e. 在石英二长岩中钍石和磁铁矿共生,且磁铁矿生长在钍石周围; f. 在石英二长岩中,可见独居石、磷钇矿、氟碳铈镧矿、星叶石等副矿物形成共生组合,且赋存于菱铁矿(Sd)、霓石、钾长石等矿物(BSE)

Fig. 4 Microphotographs and BSE images of Boziguoer alkali rocks

a. In quartz-monzodiorites, pyrochlore as yellow irregular granular aggregates, in association with fluorite, magnetite, bastnaesite and K-feldspar; b. In quartz monzonite, astrophyllite, fluorite, bastnaesite, monazite symbiosis, and biotite, K-feldspar, albite distributed together; c. In quartz monzonite, zircon, bastnaesite, astrophyllite, riebeckite, albite, fluorite distributed together; d. In quartz-monzodiorites, bastnaesite, zircon, xenotime, fluorite symbiosis, thorite distributed in zircon as tiny grains; e. In quartz monzonite, thorite and magnetite associated with each other, and thorite distributed around the magnetite; f. In quartz monzonite, monazite, xenotime, bastnaesite and astrophyllite distributed together, associated with siderite, aegirine, K-feldspar and others (BSE)

4.5 星叶石

板状,针状和长条状,完全解理,古铜黄色,褐色或黄褐色,多色性明显,消光角小,近于平行消光;干涉色从三级绿黄到三级橙红,正延性,粒径主要集中在 $250\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m} \sim 750\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 。分布比较广,在石英二长岩、石英二长闪长岩和花岗闪长岩中都有产出,其中石英二长岩产出较多。可见它与独居石、萤石、氟碳铈镧矿、锆石、钍石等副矿物共生(图 4b、4c、4f)。

4.6 萤石

无色,粉红色,且颜色分布不均;负中-高突起,糙面显著,柱状或粒状,粒径在 $100 \sim 170\ \mu\text{m}$ 。主要产出在石英二长岩和石英二长闪长岩中。在石英二长闪长岩中,可见它与烧绿石、氟碳铈镧矿、磁铁矿等共生(图 4a),也可见它与磷钇矿、锆石、氟碳铈镧矿、钍石等副矿物共生(图 4d);在石英二长岩中,萤石常与钾长石、钠长石、独居石、星叶石、氟碳铈镧矿等矿物共生(图 4b)。

4.7 钍石

黑褐色,正极高突起,全消光。多呈半自形-他形细粒状充填于其他矿物颗粒中,颗粒大小差异较大,粒径在 $5 \sim 280\ \mu\text{m}$ 。尤其经常与锆石共生在一起,并且有时以固体包裹体形式生长于锆石中(图 4d);钍石也常和磁铁矿生长在一起,且磁铁矿分布于钍石周围(图 4e);有时它也也和磷钇矿、氟碳铈镧矿、萤石共生。主要产出在石英二长岩和石英二长闪长岩中。

4.8 氟碳铈镧矿

呈细小粒状集合体或花瓣状细小连晶。蜡黄色至红褐色,薄片无色或棕褐色、淡黄色,具有微弱多色性,正高-极高突起,粒径 $30 \sim 110\ \mu\text{m}$ 。平行消光,负延性。主要在石英二长岩和石英二长闪长岩中产出,其中前者中产出较多。在石英二长闪长岩中,它与烧绿石、萤石、磷钇矿、锆石、钍石、磁铁矿等共生(图 4a、4d);在石英二长岩中它常产于钾长石、钠长石中,可见氟碳铈镧矿与独居石、星叶石、萤石、磷钇矿等副矿物共生,与黑云母、菱铁矿、霓石等矿物伴生(图 4b、4f)。

5 化学成分特征

5.1 烧绿石

为本区主要的含 Nb、Ta、U、Th 矿物(图 5a、5b、

5c),烧绿石化学式为 $(\text{Ca}, \text{Na})_2(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6(\text{OH}, \text{F}, \text{O})$,成分中约含 2% 的水。电子探针测试结果显示(表 1),石英二长闪长岩中的烧绿石 $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 在 $64.7\% \sim 67.9\%$ (表 1),平均 66.38% ; $w(\text{Ta}_2\text{O}_5)$ 为 $0.58\% \sim 1.95\%$,平均 1.11% ; $w(\text{La}_2\text{O}_3)$ 在 $0.51\% \sim 2.60\%$,平均 1.68% ; $w(\text{Ce}_2\text{O}_3)$ 在 $6.40\% \sim 8.46\%$,平均 7.79% ; $w(\text{U}_3\text{O}_8)$ 在 $5.17\% \sim 8.57\%$,平均 6.72% ; $w(\text{ThO}_2)$ 在 $0.32\% \sim 1.83\%$,平均 1.13% 。石英二长岩中的烧绿石 $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 在 $61.63\% \sim 65.07\%$,平均 63.42% ; $w(\text{Ta}_2\text{O}_5)$ 为 $0.54\% \sim 1.82\%$,平均 1.25% ; $w(\text{La}_2\text{O}_3)$ 在 $0.16\% \sim 1.97\%$,平均 0.65% ; $w(\text{Ce}_2\text{O}_3)$ 在 $0.87\% \sim 3.62\%$,平均 1.73% ; $w(\text{U}_3\text{O}_8)$ 较高(图 5d),在 $6.31\% \sim 11.31\%$,平均 8.82% ; $w(\text{ThO}_2)$ 在 $0.17\% \sim 1.97\%$,平均 1.00% 。石英二长闪长岩中的烧绿石 $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 、 $w(\text{La}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{Ce}_2\text{O}_3)$ 的平均值明显高于石英二长岩中的平均值,而 $w(\text{Ta}_2\text{O}_5)$ 、 $w(\text{U}_3\text{O}_8)$ 、 $w(\text{ThO}_2)$ 的平均含量相差不大。

5.2 独居石

根据独居石的电子探针分析结果(表 2), $w(\text{Ce}_2\text{O}_3)$ 为 $33.81\% \sim 38.12\%$; $w(\text{La}_2\text{O}_3)$ 为 $16.24\% \sim 20.65\%$; $w(\text{Pr}_2\text{O}_3)$ $1.43\% \sim 5.05\%$; $w(\text{Nd}_2\text{O}_5)$ $4.64\% \sim 9.81\%$; $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ $24.58\% \sim 28.29\%$ (表 2),另外,独居石还含有 Th、Zr、U 等稀有和放射性元素。矿物成分中稀土元素氧化物质量分数可达 $61.1\% \sim 67.66\%$,为本区重要的稀土元素矿物(图 5e、5f、5g、5h、5i)。在放射性元素氧化物中, $w(\text{ThO}_2)$ 大大高于 $w(\text{U}_3\text{O}_8)$ 。

5.3 磷钇矿

磷钇矿是本矿区产出的主要含重稀土元素矿物。表 3 列出了磷钇矿的电子探针测试结果,据此可知石英二长闪长岩磷钇矿中的 $w(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 为 $23.02\% \sim 40.21\%$,平均为 32.98% ; REE 元素 $w(\text{Gd}_2\text{O}_3 + \text{Dy}_2\text{O}_3 + \text{Er}_2\text{O}_3 + \text{Yb}_2\text{O}_3)$ 为 $20.85\% \sim 40.63\%$,平均 20.99% 。石英二长岩中磷钇矿的 $w(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 为 $37.43\% \sim 49.46\%$,平均为 43.97% ; $w(\text{Gd}_2\text{O}_3 + \text{Dy}_2\text{O}_3 + \text{Er}_2\text{O}_3 + \text{Yb}_2\text{O}_3)$ 为 $13.45\% \sim 26.45\%$,平均为 18.85% 。石英二长岩中 $w(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 的平均值明显高于石英二长闪长岩的平均值,而石英二长岩稀土元素的平均含量略低于石英二长闪长岩的平均含量。

表 1 波孜果尔碱性岩中烧绿石的电子探针分析结果
Table1 Electron microprobe analyses of pyrochlore from Boziguoer alkali rocks

样品	w(B)/%														总和
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	ThO ₂	U ₃ O ₈	ZrO ₂	F	
石英二长闪长岩															
YX2-171S-5-5-1	0.98	2.68	—	—	1.30	5.49	1.99	8.37	64.70	0.62	1.83	6.99	—	3.03	97.98
YX2-171S-5-5-2	0.74	2.70	0.08	—	1.58	6.78	2.03	7.64	65.79	0.94	0.98	5.79	—	3.12	98.17
YX2-171S-5-5-3	1.22	2.38	—	0.26	1.24	6.28	1.18	6.40	67.07	0.84	—	8.07	—	3.15	98.09
YX2-171S-5-5-4	1.09	2.56	0.05	—	1.29	6.12	0.82	7.91	67.17	0.73	—	7.55	—	3.31	98.60
YX2-171S-5-5-5	0.99	2.40	0.06	0.27	1.45	5.16	1.79	8.05	65.95	1.26	1.01	6.33	0.40	3.24	98.63
YX2-171S-5-5-6	1.01	2.91	—	—	1.37	6.41	2.37	8.46	64.90	1.63	1.42	6.07	0.21	2.98	99.74
YX2-171S-5-5-7	0.90	2.67	—	—	1.13	4.60	0.51	7.34	67.90	1.95	—	6.53	—	4.25	97.78
YX2-171S-5-5-8	1.09	2.87	0.08	—	1.50	6.21	2.02	8.34	66.71	0.58	1.18	5.17	—	3.11	98.16
YX2-171S-5-5-9	0.53	2.94	0.07	0.34	1.57	6.44	1.17	7.97	65.74	1.45	1.36	5.55	—	3.12	98.25
YX2-171S-5-5-10	0.49	2.61	—	0.14	1.70	6.14	1.92	7.57	66.66	1.39	0.84	5.43	0.30	3.07	98.26
YX2-171S-5-5-11	0.48	2.69	0.11	0.15	1.72	5.56	2.60	8.35	65.30	1.38	0.70	6.10	0.53	3.15	98.82
YX2-171S-5-5-12	0.79	2.57	0.02	—	1.54	4.27	1.71	7.59	67.53	1.05	1.18	6.78	0.05	3.14	98.22
YX2-171S-5-5-13	1.02	2.14	—	—	1.31	4.15	1.21	7.64	67.53	0.95	—	8.57	0.47	3.09	98.08
YX2-171S-5-5-14	0.77	2.83	—	0.16	1.42	5.54	1.67	8.12	66.82	1.46	0.32	6.93	0.27	3.01	99.32
YX2-171S-5-5-15	0.50	2.54	—	0.11	1.48	5.94	2.03	7.65	65.71	0.91	1.62	7.31	0.17	2.99	98.96
YX2-171S-5-5-16	1.12	2.72	—	0.21	1.39	5.55	1.81	7.21	66.52	0.67	—	8.33	0.39	3.02	98.94
石英二长岩															
T2-1	1.18	4.36	0.16	0.35	9.35	5.03	—	1.02	64.06	—	0.17	8.67	0.80	3.05	98.20
T2-2	1.04	4.42	0.20	0.35	9.04	4.71	0.51	1.21	64.06	0.54	1.23	7.62	0.33	3.09	98.35
T2-3	1.07	4.52	0.18	0.21	8.79	3.49	0.21	1.02	64.28	0.67	0.79	10.08	—	3.06	98.37
T2-4	2.07	4.71	—	0.34	8.24	2.11	—	0.87	64.11	0.76	1.11	10.08	0.31	3.58	98.29
T2-5	0.89	4.22	0.18	—	8.96	5.22	0.16	1.09	63.44	0.73	0.86	8.38	0.81	3.13	98.07
T2-6	1.33	4.34	0.12	—	9.02	5.42	0.74	1.43	65.07	—	—	7.81	—	3.22	98.50
T2-7	2.92	4.14	0.18	—	8.94	5.31	0.55	1.15	63.19	—	0.64	8.33	—	3.12	98.47
T2-8	1.31	4.20	0.11	—	9.35	5.32	—	1.43	64.44	0.81	0.78	6.33	0.93	3.21	98.22
YX4-207-SLS-1	0.49	4.23	0.03	0.37	8.13	5.47	0.76	2.76	62.97	1.70	—	7.27	0.56	3.37	98.11
YX4-207-SLS-2	0.74	4.16	—	0.20	8.04	5.64	1.12	3.62	62.05	1.25	1.18	7.38	0.13	3.22	98.73
YX4-207-SLS-3	1.27	4.05	0.11	0.27	8.37	2.73	0.51	1.78	62.60	1.51	0.76	11.05	0.40	3.18	98.69
YX4-207-SLS-4	0.73	4.31	0.07	—	8.26	5.32	0.42	1.67	62.97	1.76	—	10.72	—	3.02	99.25
YX4-207-SLS-5	0.51	3.68	0.07	0.31	8.42	4.70	1.97	1.45	61.74	1.82	—	9.87	0.28	3.26	98.08
YX4-207-SLS-6	2.67	4.53	—	0.33	7.76	3.04	—	1.76	62.63	1.11	1.85	10.53	—	3.01	99.22
YX4-207-SLS-7	0.52	4.19	—	0.23	8.44	4.03	0.49	2.45	61.63	1.77	1.15	10.20	—	3.14	98.24
YX4-207-SLS-8	1.04	4.16	0.03	—	8.84	3.94	—	1.25	63.93	1.53	—	11.31	0.57	2.97	99.57
YX4-207-SLS-9	0.69	4.33	0.07	—	8.15	4.80	0.48	2.83	64.98	0.95	1.97	6.31	0.66	3.01	99.23
YX4-207-SLS-10	0.85	4.24	0.04	—	8.34	5.92	0.54	2.41	63.41	1.77	0.45	6.77	0.47	3.22	98.43

注：“—”为低于检测限。

5.4 锆石

根据电子探针测试可知石英二长岩产出的锆石 $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 为 0.78%~3.15% (表 4), 平均 2.20%; $w(\text{HfO}_2)$ 为 0.33%~0.94%, 平均 0.59%。石英二长闪长岩的锆石 $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 为 1.81%~3.46%, 平均 2.41%; $w(\text{HfO}_2)$ 为 0.10%~0.98%, 平均 0.56%。两种岩石中锆石的 $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 、 $w(\text{HfO}_2)$ 变化不明显。

5.5 星叶石

星叶石为含水及含铷铯铌氟矿物, 水的含量可

达 4%。星叶石的化学式为 $(\text{K}, \text{Na})_3 \{(\text{Fe}, \text{Mn})_7 [\text{Ti}_2(\text{Si}_4\text{O}_{12})_2](\text{O}, \text{OH})_3(\text{OH}, \text{F})_4\}$ 。根据电子探针测试结果 (表 5): 石英二长闪长岩产出的星叶石 $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 为 5.50%~7.52%, 平均 6.26%; $w(\text{Rb}_2\text{O})$ 为 2.29%~2.87%, 平均 2.55%; $w(\text{Cs}_2\text{O})$ 为 0.33%~0.74%, 平均 0.56%。而石英二长岩中的星叶石 $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 为 0.32%~5.67%, 平均 2.26%; $w(\text{Rb}_2\text{O})$ 为 1.33%~2.31%, 平均 1.87%; $w(\text{Cs}_2\text{O})$ 为 0.32%~2.29%, 平均 1.40%。

表 2 波孜果尔石英二长岩中独居石的电子探针分析结果

Table 2 Electron microprobe analyses of monazite from Boziguoer alkali rocks

样品号	w(B)/%												总和
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	P ₂ O ₅	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₅	ThO ₂	U ₃ O ₈	ZrO ₂	
YX2-143S-1	1.83	—	—	—	25.18	20.65	34.56	1.43	6.21	8.17	—	1.03	99.06
YX2-143S-2	1.50	0.07	—	—	24.72	19.90	33.81	3.37	6.92	7.76	0.33	1.76	100.14
YX2-143S-3	1.53	—	0.07	—	25.89	19.75	34.67	2.95	6.93	6.45	0.22	0.49	98.95
YX2-143S-4	1.65	0.12	0.73	—	24.67	18.78	34.01	3.27	5.91	8.70	0.55	1.59	99.98
YX2-143S-5	1.91	0.10	0.63	—	25.20	18.97	34.91	2.58	4.64	9.44	—	1.19	99.57
YX1-010-1	1.01	0.06	0.27	—	25.76	17.13	37.54	3.16	6.91	5.87	0.62	1.62	99.95
YX1-010-2	1.26	0.08	0.58	0.14	24.58	17.26	37.49	3.06	6.97	6.17	0.66	1.07	99.32
YX1-010-3	0.97	0.07	0.71	0.11	25.33	18.14	35.57	4.32	7.05	5.48	—	1.47	99.22
YX1-010-4	0.74	0.12	0.43	0.24	27.83	17.41	38.12	1.84	6.86	5.19	—	0.81	99.59
YX1-010-5	0.81	—	0.62	—	27.61	16.24	36.64	2.97	7.80	5.89	0.17	0.88	99.63
YX1-010-2-1	0.94	—	0.72	0.13	27.15	16.88	36.65	3.45	7.02	5.25	—	1.08	99.27
YX1-010-2-2	0.83	—	0.08	0.25	25.67	18.55	37.89	2.23	6.15	5.92	—	1.53	99.10
YX1-010-2-3	0.95	0.08	0.27	0.27	25.71	19.33	36.85	2.02	6.56	7.34	—	1.16	100.54
YX1-010-2-4	1.16	—	—	0.27	25.12	18.25	36.84	3.08	6.38	7.17	—	2.09	100.36
YX1-010-2-5	0.78	0.19	0.22	0.27	27.13	17.54	37.13	2.28	7.63	4.37	—	1.38	98.92
T4-D-1	0.76	0.14	—	0.23	27.04	17.35	36.64	3.75	9.07	2.32	—	2.20	99.50
T4-D-2	0.73	—	—	0.08	28.18	16.77	37.64	3.64	9.22	3.06	—	0.69	100.01
T4-D-3	0.33	0.12	0.14	0.30	28.29	16.59	37.37	3.89	9.81	1.66	—	0.76	99.26
T4-D-4	0.70	0.17	—	0.21	28.01	17.53	36.46	2.47	9.39	1.73	—	2.24	98.91
T4-D-5	1.13	0.56	0.59	0.30	27.21	16.94	35.64	4.69	9.25	1.62	—	1.26	99.19
T6-D-1	0.55	0.13	0.22	0.04	27.38	16.42	35.59	5.05	9.43	2.64	0.38	1.11	98.94
T6-D-2	1.34	—	—	—	26.89	17.17	36.47	3.19	8.46	3.82	0.25	1.39	98.98
T6-D-3	1.13	0.20	0.24	0.25	27.19	18.54	36.36	3.37	8.50	3.53	—	—	99.31
T6-D-4	0.85	0.07	—	0.15	26.90	19.90	36.26	2.39	7.57	3.64	—	1.61	99.34
T6-D-5	0.84	—	0.21	—	26.71	18.47	36.00	3.31	8.22	4.20	—	1.30	99.26

注：“—”为低于检测限。

表 3 波孜果尔碱性岩中磷钇矿的电子探针分析结果

Table 3 Electron microprobe analyses of xenotime from Boziguoer alkali rocks

样品号	w (B)/%										总和
	SiO ₂	CaO	P ₂ O ₅	Gd ₂ O ₃	Dy ₂ O ₃	Er ₂ O ₃	Yb ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	ThO ₂	ZrO ₂	
石英二长闪长岩											
YX2-171S-5-1-1	2.27	—	34.52	2.62	8.59	9.24	7.42	35.20	—	—	99.86
YX2-171S-5-1-2	0.50	0.20	34.03	2.93	9.86	9.45	7.94	34.62	0.51	—	100.04
YX2-171S-5-1-3	1.15	0.23	33.17	1.40	8.30	8.97	8.43	34.59	0.12	0.43	98.79
YX2-171S-5-1-4	2.09	0.03	35.14	2.24	7.21	6.25	5.15	40.21	0.65	—	98.97
YX2-171S-5-1-5	1.78	—	35.19	2.49	8.06	6.19	7.29	38.21	—	—	99.21
YX2-171S-Lin-1	3.13	—	32.74	1.78	8.67	11.18	8.57	32.24	—	—	98.31
YX2-171S-Lin-2	0.63	0.28	33.10	2.73	9.63	11.00	13.34	27.56	—	—	98.27
YX2-171S-Lin-3	3.66	0.07	32.73	2.21	8.51	13.20	14.34	25.27	—	—	99.99
YX2-171S-Lin-5	3.14	0.09	33.42	3.00	8.53	13.09	16.01	23.02	—	—	100.30
YX2-171S-Lin-4	1.21	0.22	34.24	1.42	8.99	12.18	14.38	26.31	—	—	98.95
YX2-171S-Lin-6	0.88	0.08	35.05	1.66	6.40	8.84	8.29	37.29	—	—	98.49
YX2-171S-Lin-7	0.57	—	34.92	2.28	7.96	8.75	7.96	36.91	—	—	99.35
YX2-171S-Lin-8	0.65	0.17	34.82	1.65	9.03	10.04	8.05	34.30	—	—	98.71
YX2-171S-Lin-9	0.44	0.09	35.14	2.32	8.51	8.48	7.43	35.78	—	—	98.19
YX2-171S-Lin-10	0.86	—	34.95	1.83	8.72	10.82	8.06	33.23	—	—	98.47

续表 3

Count. Table 3

样品号	w(B)/%										
	SiO ₂	CaO	P ₂ O ₅	Gd ₂ O ₃	Dy ₂ O ₃	Er ₂ O ₃	Yb ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	ThO ₂	ZrO ₂	总和
石英二长岩											
T1-LYK2-1	0.56	0.04	33.98	2.61	6.60	9.39	7.85	37.43	0.16	—	98.62
T1-LYK2-2	0.79	0.11	35.68	2.40	5.58	7.52	5.48	41.72	—	—	99.28
T1-LYK2-3	0.55	—	35.81	2.85	6.25	7.01	4.94	41.63	—	—	99.04
T1-LYK2-4	0.82	—	34.71	2.15	6.27	7.33	4.85	42.97	0.66	—	99.76
T1-LYK2-5	0.66	—	34.35	2.63	6.03	7.85	5.40	42.19	0.22	—	99.33
T1-LYK2-6	0.71	—	35.32	2.81	5.82	7.28	4.96	41.91	—	—	98.81
T1-LYK2-7	0.79	0.01	35.28	2.54	6.05	6.93	4.81	42.16	—	—	98.57
T1-LYK2-8	0.57	0.25	35.36	2.55	5.92	6.65	4.99	42.46	0.20	—	98.95
T1-LYK2-9	0.92	—	36.07	1.93	5.24	7.05	5.31	42.12	0.26	—	98.90
T6-LYK2-1	0.98	0.60	33.36	2.72	7.29	5.85	3.40	42.72	—	2.12	99.04
T6-LYK2-2	1.54	0.15	33.45	2.80	6.44	7.91	3.74	42.01	—	1.14	99.18
T6-LYK2-3	0.95	0.03	33.42	3.01	6.82	7.84	4.13	41.90	—	1.26	99.36
T6-LYK2-4	0.80	0.17	36.49	1.92	7.27	6.39	3.60	41.83	—	0.78	99.25
T6-LYK2-5	0.53	0.10	35.38	2.56	6.53	6.28	3.37	43.48	—	0.89	99.12
T6-LYK2-6	1.07	0.04	33.71	2.09	7.44	6.91	3.50	43.04	—	0.83	98.63
T6-LYK2-7	0.85	—	34.64	2.60	7.03	7.43	3.48	42.73	—	0.86	99.62
T6-LYK2-8	0.74	—	34.51	2.82	7.31	7.15	3.46	42.16	—	1.03	99.18
YX4-207-LYK2-1	1.16	0.06	35.51	1.99	2.33	5.93	4.07	48.91	—	—	99.96
YX4-207-LYK2-2	1.04	—	36.84	1.41	3.11	5.66	3.95	47.79	—	—	99.80
YX4-207-LYK2-3	0.94	0.12	36.20	2.02	3.63	5.32	4.75	46.73	—	—	99.71
YX4-207-LYK2-4	0.80	—	36.20	1.22	2.62	5.42	4.19	49.17	—	—	99.62
YX4-207-LYK2-5	1.09	—	34.97	1.26	3.55	5.66	4.70	48.52	—	—	99.75
YX4-207-LYK2-6	0.82	—	35.16	1.90	3.78	6.17	5.11	46.07	—	—	99.01
YX4-207-LYK2-7	0.81	—	36.69	1.51	2.74	4.81	4.48	49.46	—	—	100.50
YX4-207-LYK2-8	0.85	0.02	36.04	1.83	3.95	5.34	5.62	46.38	—	—	100.03
YX4-207-LYK2-9	1.09	0.01	35.25	2.04	4.90	5.63	4.57	45.62	—	—	99.11

注：“—”为低于检测限。

表 4 波孜果尔碱性岩中锆石的电子探针分析结果

Table 4 Electron microprobe analyses of zircon from Boziguoer alkali rocks

样品号	w(B)/%												
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	HfO ₂	Nb ₂ O ₅	ThO ₂	UO ₃	ZrO ₂	总和
石英二长闪长岩													
YX2-143S-2-1	31.42	0.11	0.20	0.34	—	0.07	0.06	0.31	2.12	0.51	—	64.32	99.46
YX2-143S-2-2	30.98	0.01	0.33	0.44	—	—	0.23	0.91	2.46	0.45	0.30	61.08	97.19
YX2-143S-2-3	31.52	—	0.09	0.17	—	0.05	—	—	2.06	—	0.59	64.70	99.18
YX2-143S-2-4	31.35	—	—	—	—	—	—	0.61	2.34	—	0.37	65.23	99.90
YX2-143S-2-5	32.10	—	0.18	0.10	—	—	0.14	0.86	1.94	0.03	0.72	63.19	99.26
T3-1	30.90	0.14	—	0.21	0.04	0.03	0.03	—	3.46	0.08	0.62	63.87	99.38
T3-2	31.33	—	—	0.08	—	—	0.16	—	2.52	0.33	—	64.71	99.13
T3-3	31.43	0.15	0.06	0.27	0.03	0.13	—	0.98	2.59	—	0.84	62.73	99.21
T2-G3-1	31.81	0.10	0.09	—	—	0.15	0.26	—	2.91	0.61	0.40	62.31	98.64
T2-G3-2	31.71	—	0.17	0.33	—	—	0.10	0.10	1.81	—	—	64.47	98.69
T2-G3-3	31.36	—	—	0.37	—	0.09	—	0.15	2.28	—	—	65.02	99.27
石英二长岩													
YX2-171S-1	31.42	—	—	—	0.20	0.04	0.02	0.94	2.49	0.48	—	64.02	99.61
YX2-171S-2	31.58	—	0.10	0.04	—	—	0.20	0.48	2.42	—	0.51	65.44	100.77
YX2-171S-3	31.47	—	—	0.19	—	0.07	—	0.88	0.78	—	0.07	65.53	98.99
YX2-171S-4	31.12	—	—	0.06	0.17	0.10	—	0.33	3.15	0.02	0.88	64.03	99.86
YX2-171S-5	30.88	—	0.06	0.05	—	0.06	—	0.33	2.15	—	0.44	64.54	98.51

注：“—”为低于检测限。

表 5 波孜果尔碱性岩中星叶石的电子探针分析结果
Table 5 Electron microprobe analyses of astrophyllite from Boziguoer alkali rocks

样品号	w(B)/%														
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _T	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Nb ₂ O ₅	Rb ₂ O	Cs ₂ O	ZrO ₂	F	总和
石英二长闪长岩															
YX2-17IS-XYS-1	34.51	8.05	0.89	31.29	2.93	—	0.05	3.90	4.52	5.90	2.87	0.71	0.62	1.59	97.83
YX2-17IS-XYS-2	34.74	7.52	1.05	30.65	3.37	—	0.07	4.24	4.13	6.12	2.54	0.65	0.31	1.58	95.39
YX2-17IS-XYS-3	33.76	7.52	1.26	31.71	2.76	—	0.06	3.30	4.59	7.30	2.29	0.61	0.75	1.58	97.49
YX2-17IS-XYS-4	34.46	8.23	0.89	32.51	1.79	—	0.31	3.63	4.77	5.50	2.54	0.62	0.51	1.57	97.33
YX2-17IS-XYS-5	34.49	7.54	1.01	31.18	1.93	—	0.18	3.27	4.61	7.09	2.68	0.74	0.81	1.57	97.10
YX2-17IS-XYS-6	33.29	7.48	1.11	31.18	2.83	—	0.18	3.70	4.28	7.52	2.83	0.68	0.60	1.56	97.24
YX2-17IS-7-XYS2-1	33.81	8.02	0.99	32.30	1.98	—	0.10	3.37	4.38	6.49	2.87	0.55	0.60	1.61	97.07
YX2-17IS-7-XYS2-2	33.18	7.70	0.97	34.17	2.80	0.17	0.16	2.74	4.67	5.74	2.35	0.47	0.82	1.59	97.53
YX2-17IS-7-XYS3-3	34.62	7.96	0.87	32.76	2.07	—	0.33	3.59	4.49	5.84	2.49	0.45	0.43	1.58	97.48
YX2-17IS-XYS3-1	34.25	8.05	0.80	31.27	2.87	—	—	3.65	4.48	6.04	2.44	0.49	0.87	1.63	96.84
YX2-17IS-XYS3-2	34.66	7.82	0.73	32.54	2.65	0.05	0.16	3.86	4.54	5.90	2.37	0.47	0.56	1.59	97.90
YX2-17IS-XYS3-3	34.19	8.03	0.92	32.25	2.61	0.14	0.18	3.56	4.77	5.67	2.29	0.33	0.38	1.60	96.92
石英二长岩															
TI-1	35.78	11.08	0.85	32.48	3.37	0.19	0.65	3.75	2.67	1.41	1.87	1.04	—	1.61	96.75
TI-2	35.73	10.51	0.64	33.33	3.63	—	0.46	3.50	2.47	1.38	1.94	1.57	—	1.60	96.76
TI-3	36.36	11.08	1.01	33.68	3.54	—	0.59	3.17	2.47	0.32	2.13	1.24	—	1.60	97.19
TI-4	36.27	10.90	0.67	34.32	3.72	0.02	0.62	2.99	2.65	—	1.94	0.83	—	1.61	96.54
TI-5	36.08	10.76	0.72	33.20	3.82	0.08	0.60	3.71	2.75	0.69	1.72	0.80	—	1.61	96.54
TI-6	36.00	11.23	0.66	33.52	3.28	0.06	0.53	3.46	3.01	0.49	1.53	0.82	—	1.59	96.18
TI-7	35.58	10.20	0.76	33.25	3.70	—	0.31	3.45	2.99	1.59	2.27	1.24	—	1.60	96.94
TI-2-XI-1	35.71	10.01	0.96	33.21	2.08	0.19	1.28	3.98	2.20	0.57	1.81	2.07	—	1.61	96.69
TI-2-XI-2	35.55	10.08	1.25	32.91	2.65	—	1.28	3.57	2.33	1.47	2.06	1.87	—	1.62	96.64
TI-2-XI-3	35.61	9.93	1.31	32.83	2.57	—	1.51	3.50	2.75	0.74	2.27	2.21	0.30	1.60	97.13
TI-2-XI-4	35.32	9.65	1.35	33.51	2.37	0.23	1.24	3.35	2.81	—	1.97	2.20	—	1.61	95.61
TI-2-XI-5	35.73	10.24	1.27	33.00	2.25	0.20	1.36	3.49	2.71	—	2.11	2.18	—	1.61	96.15
TI-2-XI-6	36.18	9.90	0.92	32.57	2.63	0.31	1.18	3.66	2.37	1.19	1.92	2.22	—	1.60	96.65
TI-2-XI-7	36.18	10.15	1.36	33.00	2.10	0.30	1.36	3.37	2.62	—	2.31	2.03	—	1.60	96.38
TI-2-XI-8	35.41	9.07	1.14	32.98	2.88	0.30	1.30	3.53	2.75	—	2.24	2.29	0.31	1.61	95.81
TI-2-XI-9	35.47	10.00	1.48	32.58	2.52	0.30	1.54	3.10	2.71	—	2.09	2.19	—	1.60	95.58
TI-2-XI-10	35.26	10.00	1.28	33.63	2.34	0.28	1.34	3.14	2.54	1.14	1.78	2.22	0.06	1.61	96.62
YX2-143S-4-3-1	34.12	7.49	0.85	32.76	2.93	—	0.25	3.35	4.64	4.98	1.33	0.37	0.60	1.56	95.23
YX2-143S-4-3-2	34.18	8.02	1.01	31.40	3.41	—	0.07	3.21	4.51	4.84	1.52	0.39	0.58	1.55	94.69
YX2-143S-4-3-3	33.85	7.62	0.80	31.69	3.21	—	0.06	3.15	4.71	5.67	1.52	0.32	0.86	1.55	95.01
YX2-143S-4-3-4	33.59	7.79	0.86	32.32	3.06	—	0.33	3.55	4.38	4.60	1.40	0.34	1.10	1.56	94.88
YX2-143S-4-3-5	33.68	8.06	0.86	32.78	2.81	—	0.18	3.25	4.58	5.03	1.40	0.36	0.86	1.55	95.40

注：FeO_T 表示全铁；“—”为低于检测限。

石英二长闪长岩中星叶石 $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 、 $w(\text{Rb}_2\text{O})$ 高于石英二长岩中星叶石的,而石英二长岩星叶石中的 $w(\text{Cs}_2\text{O})$ 高于石英二长闪长岩中星叶石的。

5.6 萤石

萤石为本矿区主要含氟矿物。电子探针测试结果(表 6)显示：石英二长闪长岩中萤石 $w(\text{Y})$ 为 1.84%~3.40%，平均 2.58%； $w(\text{Ce})$ 为 0.26%~2.22%，平均 1.14%。石英二长岩中萤石 $w(\text{Y})$ 为 1.39%~3.14%，平均 2.42%； $w(\text{Ce})$ 为 0.05%~

0.97%，平均 0.37%。两种岩石中萤石的 $w(\text{Y})$ 相差不大,而石英二长闪长岩中萤石 $w(\text{Ce})$ 明显高于石英二长岩中萤石的,氟的含量变化不大。

5.7 钍石

钍石为含水矿物,水的含量 4%~11% 不等,为本矿区主要含放射性矿物。根据电子探针测试可知(表 7):钍石的 $w(\text{ThO}_2)$ 在 68.78%~76.48%； $w(\text{SiO}_2)$ 在 11.93%~15.88%； $w(\text{U}_2\text{O}_5)$ 在 0.01%~7.1%。钍石的化学成分变化很大,主要是由于钍

表 6 波孜果尔碱性岩中萤石的电子探针分析结果
Table 6 Electron microprobe analyses of fluorite from Boziguoer alkali rocks

样品号	w(B)/%				总和
	Ca	Y	Ce	F	
石英二长闪长岩					
YX2-143S-2-5-1	47.48	2.25	1.39	48.22	99.34
YX2-143S-2-5-2	46.24	2.48	2.22	48.36	99.30
YX2-143S-2-5-3	47.19	2.34	1.81	48.02	99.36
YX2-143S-2-5-4	46.78	2.63	2.02	48.41	99.84
YX2-143S-2-5-5	47.16	2.70	1.30	48.28	99.44
YX2-171S-5-3-1	46.15	3.09	0.79	48.96	98.99
YX2-171S-5-3-2	47.15	3.40	0.26	48.46	99.27
YX2-171S-5-3-3	49.06	1.84	0.26	47.95	99.11
YX2-171S-5-3-4	48.45	2.60	0.77	47.86	99.68
YX2-171S-5-3-5	48.35	2.51	0.53	48.37	99.76
石英二长岩					
T3-1	48.40	2.40	0.25	48.86	99.91
T3-2	48.69	2.70	0.11	48.32	99.82
T3-3	48.12	3.14	0.12	48.49	99.87
T3-4	48.40	1.96	0.16	48.72	99.24
T3-5	48.15	2.27	0.40	48.91	99.73
T3-6	47.63	2.97	-	48.86	99.46
T3-7	48.90	2.74	-	47.98	99.62
T3-8	48.11	2.78	0.53	47.91	99.33
T3-9	47.78	3.12	0.05	48.97	99.92
T5-1-YING2-1	48.27	1.87	0.37	48.83	99.34
T5-1-YING2-2	49.26	2.20	-	48.21	99.67
T5-1-YING2-3	49.47	1.39	-	48.70	99.56
T5-1-YING2-4	48.74	1.72	0.58	48.68	99.72
T5-1-YING2-5	47.77	1.80	0.97	48.75	99.29
T5-1-YING2-6	48.59	2.09	0.57	48.02	99.27
T5-1-YING2-7	50.05	1.90	-	47.86	99.81
T5-1-YING2-8	49.21	1.69	-	48.84	99.74
T5-1-YING2-9	50.15	1.62	-	47.87	99.64

注：“-”为低于检测限。

石晶体结构受 Th 和 U 放射性衰变时产生的 α 粒子的破坏所引起的,所以 Th 可以被许多其他元素所代替,如 U、Zr、Pb 等。石英二长闪长岩中钍石 Al_2O_3 、CaO、 ThO_2 含量较高,而在石英二长岩中 SiO_2 的含量相对较多。

5.8 氟碳铈镧矿

氟碳铈镧矿为含水及二氧化碳矿物,水的含量约 2%,二氧化碳的含量 10%~20% 不等。电子探针测试结果(表 8)显示,在波孜果尔碱性岩中的氟碳铈镧矿 $w(La_2O_3)$ 为 20.03%~36.03%; $w(Ce_2O_3)$ 为 35.5%~44.78%。石英二长闪长岩中氟碳铈镧矿 La_2O_3 的含量较高,而石英二长岩中氟碳铈镧矿 CaO 的含量较高。

6 讨论

6.1 有用元素的赋存状态

实验结果表明,该碱性岩岩株中稀有及稀土元素矿物种类繁多且成分复杂,有用元素品位高,且伴生有益组分。这些副矿物常以不同的共生组合形式在碱性岩中产出。本矿区含铈的矿物为烧绿石。在锆石、星叶石、氟碳铈镧矿中均含有不等量的铈,同时为钽元素的载体。氟碳铈镧矿、独居石、磷钇矿为主要含稀土元素矿物。在萤石、烧绿石中,也含有少量的稀土元素。放射性元素主要赋存于氟碳铈镧矿、钍石、锆石、独居石、烧绿石中。星叶石中含有铷、铯等稀有元素。

6.2 矿物化学元素替代

烧绿石的化学式为 $(Ca,Na)_2Nb_2O_6(OH,F)$ 。其中标准矿物成分中 $w(Na_2O)$ 为 8.52%, $w(CaO)$ 为 15.41%, $w(Nb_2O_5)$ 为 73.05%, $w(F)$ 为 5.22%。烧绿石的 A 组阳离子主要为 Ca、Na,它们常被 U、REE、Y、Th、Pb、Sb、Bi 等所替代(王濮等,1987)。烧绿石由于元素间的替代关系,可出现多种变种。本研究区产出的烧绿石介于烧绿石与铈烧绿石之间。从研究区采集的样品中,烧绿石的电子探针数据 $w(Na_2O)$ 为 2.11%~6.78%, $w(CaO)$ 为 1.13%~9.35%,明显低于标准矿物中的相应值。而测试样品中 $w(U_3O_8)$ 为 5.17%~11.31%, $w(ThO_2)$ 为 0.17%~1.97%, $w(La_2O_3)$ 为 0.16%~2.6%, $w(Ce_2O_3)$ 为 0.87%~8.46% 由此可以推断,研究区中烧绿石的 Ca、Na 可能被 U、Th 和 REE 所替代。

磷钇矿的化学式为 $Y(PO_4)_3$,其中标准矿物成分中 $w(Y_2O_3)$ 为 61.40%, $w(P_2O_5)$ 为 38.60%。理论上阳离子除 Y 外,还有 HREE 混入,以 Yb、Er、Dy 为主,而 LREE 混入较少。Zr、Th 等替代 Y、Si 替代 P(王濮等,1987)。从本次采集样品的测试结果来看,阳离子中 $w(Y_2O_3)$ 为 23.02%~49.46%,明显低于标准矿物的理论值,而研究区样品中的电子探针测试数据表明(表 3),磷钇矿富含 HREE,由此可以推断,磷钇矿的阳离子可能有 HREE 混入。

通过电子探针分析,石英二长闪长岩中的星叶石 $w(Nb_2O_5)$ 、 $w(Rb_2O)$ 多,而石英二长岩中的星叶石 $w(TiO_2)$ 较多。

表 7 波孜果尔碱性岩中钍石的电子探针分析结果

Table 7 Electron microprobe analyses of thorite from Boziguoer alkali rocks

样品号	w(B)/%								总和
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃	PbO	ThO ₂	U ₂ O ₅	
石英二长闪长岩									
YX2-171S-1	—	15.03	0.37	—	0.18	0.41	70.95	6.67	93.61
YX2-171S-2	—	11.93	1.90	—	1.40	0.55	76.48	0.83	93.09
YX2-171S-3	0.56	12.55	1.66	0.15	3.99	0.99	73.30	0.22	93.42
YX2-171S-4	0.61	13.15	1.51	0.54	1.29	1.82	73.45	0.97	93.34
YX2-171S-5	0.55	12.93	1.62	0.84	2.58	1.53	73.11	0.30	93.46
石英二长岩									
T4-1	0.41	13.55	0.35	—	0.75	1.23	71.81	5.13	93.23
T4-2	—	15.52	0.11	—	0.86	1.58	71.21	4.91	94.19
T4-3	—	15.69	0.16	—	0.75	1.45	75.30	0.51	93.86
T4-4	0.02	15.64	0.24	—	0.66	1.47	75.57	0.01	93.61
T4-5	0.11	15.82	0.23	—	0.61	1.41	74.39	0.91	93.48
T4-6	—	15.28	0.02	—	0.36	1.08	72.17	4.08	92.99
T4-7	—	15.82	0.09	—	0.45	1.37	70.57	5.11	93.41
T4-8	0.06	15.76	0.12	—	—	1.55	68.78	7.10	93.37
T5-1	—	15.58	0.10	—	—	0.79	72.35	4.36	93.18
T5-2	—	15.56	0.35	—	0.44	0.84	71.55	5.06	93.80
T5-3	—	15.15	0.12	—	—	1.09	70.94	5.80	93.10
T5-4	—	15.24	0.08	—	0.22	0.47	72.01	5.57	93.59
T5-5	0.07	15.88	0.08	—	—	1.31	70.60	5.90	93.84
T5-6	—	15.29	0.17	—	—	1.41	71.71	4.84	93.42
T5-7	0.10	15.35	—	—	0.22	1.49	69.89	6.63	93.68

注：“—”为低于检测限。

表 8 波孜果尔碱性岩中氟碳铈镧矿的电子探针分析结果

Table 8 Electron microprobe analyses of bastnaesite from Boziguoer alkali rocks

样品号	w(B)/%													总和
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	K ₂ O	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	ThO ₂	F		
石英二长闪长岩														
YX2-171S-5-2-1	0.12	0.17	—	—	—	0.06	31.52	40.23	0.60	3.12	0.42	7.01	83.25	
YX2-171S-5-2-2	0.33	—	0.13	—	0.12	—	29.12	37.95	2.13	4.56	0.34	7.03	81.71	
YX2-171S-5-2-3	0.45	—	0.01	—	0.15	—	30.10	39.20	1.56	5.17	0.85	7.31	84.80	
YX2-171S-5-2-4	0.20	0.05	0.14	—	0.13	—	29.37	37.39	3.95	5.36	1.00	8.02	85.61	
YX2-171S-5-2-5	0.36	—	—	—	0.06	—	32.29	37.23	3.14	4.06	0.77	7.52	85.43	
YX2-171S-5-2-6	0.26	—	—	—	—	—	35.27	37.99	1.36	2.40	0.63	7.22	85.13	
YX2-171S-5-2-7	0.23	—	—	—	0.15	0.03	36.03	35.50	1.60	2.60	0.65	7.00	83.79	
YX2-171S-5-2-8	0.33	—	—	—	0.12	0.02	34.63	37.42	1.46	3.11	0.72	7.32	85.13	
YX2-171S-5-3-1	0.17	—	—	—	0.27	0.05	30.52	39.65	2.13	4.29	0.54	7.41	85.03	
YX2-171S-5-3-2	0.06	0.09	—	—	0.09	0.01	30.08	40.2	0.83	5.27	0.31	8.01	84.95	
YX2-171S-5-3-3	0.14	—	—	—	—	—	28.34	39.93	3.29	4.25	0.28	7.51	83.74	
YX2-171S-5-3-4	0.16	0.02	—	—	0.1	0.07	30.08	38.72	1.95	3.12	0.68	7.53	82.43	
YX2-171S-5-3-5	0.15	0.02	—	—	0.06	—	28.37	39.53	3.28	4.08	—	7.13	82.62	
石英二长岩														
T2-F-1	0.40	—	—	0.18	0.30	—	23.09	42.49	3.65	5.33	0.43	7.26	83.13	
T2-F-2	0.50	0.17	—	0.24	0.25	—	20.03	43.19	5.39	7.98	—	7.61	85.36	
T2-F-3	0.57	—	—	—	0.15	—	21.54	42.00	4.14	5.73	0.86	7.82	82.81	
T2-F-4	0.40	—	0.32	0.13	0.24	—	25.09	43.51	2.51	5.28	—	7.56	85.04	
T2-F-5	0.48	0.11	—	—	0.40	—	20.53	42.74	3.89	5.94	1.30	7.65	83.04	
T2-F-6	0.40	0.06	—	0.03	0.44	—	20.99	42.55	2.98	7.97	0.14	8.01	83.57	
T2-F-7	0.50	0.06	0.14	—	0.91	—	23.26	39.80	3.48	5.34	1.90	7.23	82.62	
T2-F-8	0.34	—	—	—	0.77	—	24.09	40.97	2.89	5.63	2.02	7.31	84.02	
T2-F-9	0.81	—	—	0.17	0.70	—	24.33	44.78	1.17	3.26	0.93	7.51	83.66	
T2-F-10	0.35	0.32	—	—	0.33	—	24.34	43.93	3.43	5.74	—	7.03	85.47	
T2-F-11	0.72	—	0.29	0.68	0.44	—	23.20	39.99	3.24	5.18	2.66	7.26	83.66	
T2-F-12	0.46	0.16	—	0.17	0.31	—	23.60	40.26	2.75	5.45	1.43	7.31	81.90	
T2-F-13	0.29	0.20	0.21	—	0.27	—	21.63	43.89	2.83	6.18	0.35	7.52	83.37	

注：“—”为低于检测限。

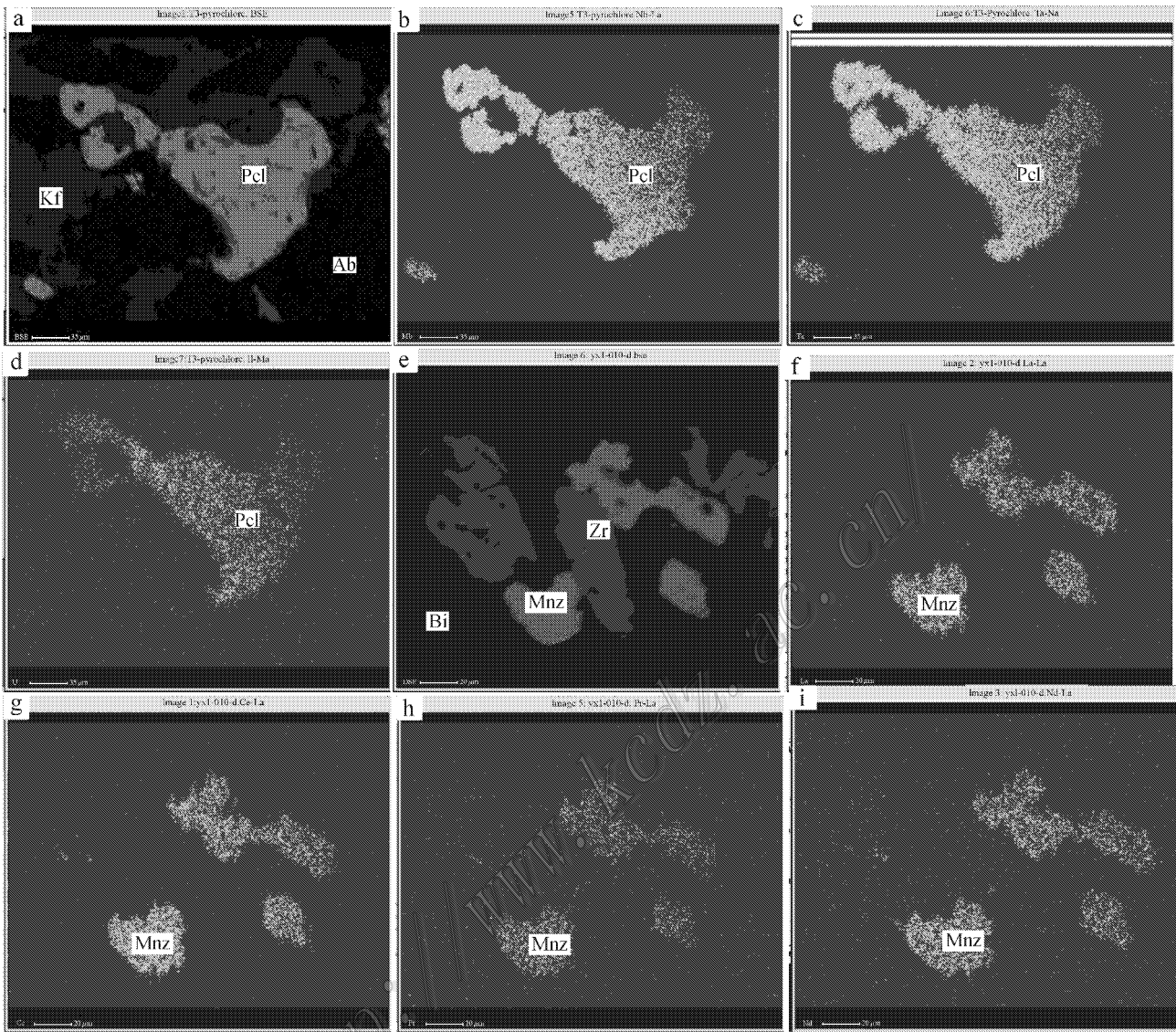


图 5 波孜果尔碱性岩背散射和面扫描图像

a. 烧绿石呈不规则粒状产出在钠长石和钾长石中(BSE 照片); b. 烧绿石 Nb 面扫描; c. 烧绿石 Ta 面扫描; d. 烧绿石 U 面扫描; e. 独居石呈自形柱状与锆石、黑云母分布在一起(BSE 照片); f. 独居石 La 面扫描; g. 独居石 Ce 面扫描; h. 独居石 Pr 面扫描; i. 独居石 Nd 面扫描

Fig. 5 BSE and scope scanning microanalysis images of Boziguoer alkali rocks

a. Irregular granular pyrochlore distributed in albite and K-feldspar (BSE); b. Nb scanning microanalysis images of pyrochlore; c. Ta scanning microanalysis images of pyrochlore; d. U scanning microanalysis images of pyrochlore; e. Monazite as euhedral column, associated with zircon and biotite (BSE); f. La scanning microanalysis images of monazite; g. Ce scanning microanalysis images of monazite; h. Pr scanning microanalysis images of monazite; i. Nd scanning microanalysis images of monazite

萤石的标准化学式是 CaF_2 , 其中 $w(\text{Ca})$ 为 51.1%, $w(\text{F})$ 为 48.9%。Ca 常被 REE (主要是 Y 和 Ce) 代替(王濮等, 1987)。在研究区产出的萤石中, $w(\text{Ca})$ 为 46.15% ~ 50.15%, 低于标准矿物中 Ca 的含量, 而 $w(\text{Y})$ 为 1.39% ~ 3.4%, $w(\text{Ce})$ 为 0.05% ~ 2.22%, 可以推断, 萤石中的 Ca 可能被 Y 和 Ce 替代。

钍石的标准化学式为 $\text{Th}[\text{SiO}_4]$, 其中, $w(\text{ThO}_2)$ 为 81.5%, $w(\text{SiO}_2)$ 为 18.5%。钍石的成分变化很大, Th 可以被许多元素所替代, 最常见的有 U、Fe、Ca、REE (特别是 Ce)、Zr、Pb (王濮等, 1987), 研究区的钍石中, $w(\text{ThO}_2)$ 与 $w(\text{U}_2\text{O}_5)$ 呈反消长关系(图 6), 说明 ThO_2 和 U_2O_5 呈类质同象替代。同时, 赋存于锆石中的钍石, $w(\text{U})$ 明显高于磁

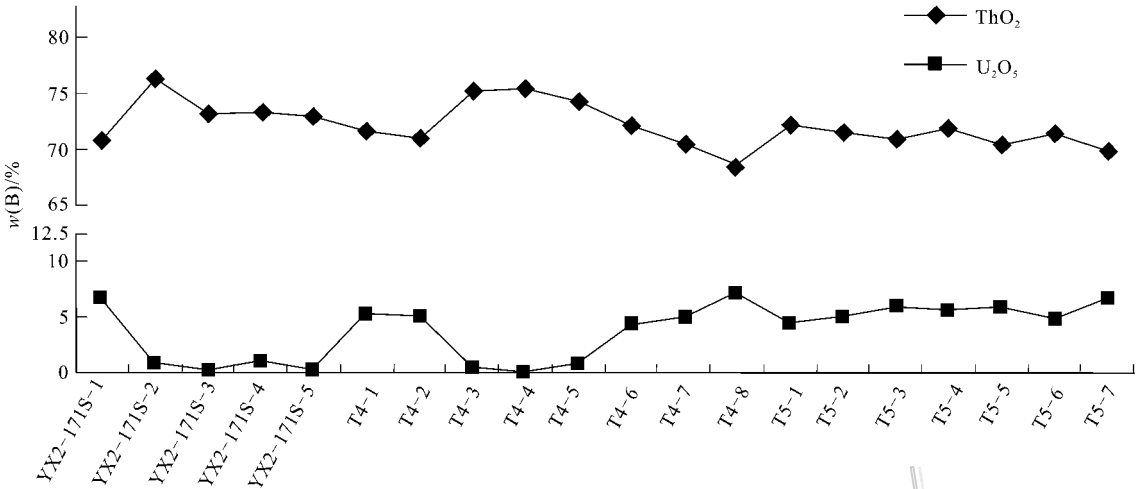


图 6 波孜果尔碱性岩中钍石中 ThO_2 和 U_2O_5 化学成分变化图解

Fig. 6 Diagrams of ThO_2 and U_2O_5 of thorite from Boziguoer alkali rocks

铁矿中钍石的。

氟碳铈镧矿的化学式为 $(\text{Ce}, \text{La})[\text{CO}_3]\text{F}$, 类质同象代替 Ce 的有 La、Nd、Sm、Pr、Th、Y 等, 其中以钍族稀土元素为主(王濮等, 1987)。而在研究区的氟碳铈镧矿的电子探针测试结果表明, 混入物 La_2O_3 、 Pr_2O_3 、 Nd_2O_3 、 ThO_2 含量较高(表 8), 它们可能替代了 Ce_2O_3 。

6.3 独居石、锆石化学成分变化及其类型

独居石中镧系元素的 $(\text{La} > \text{Nd} > \text{Pr} > \text{Sm} > \text{Gd})$ 类质同象成分比可达 1:1, 也经常有 Th、Y、U、Ca、Si 及 S 作类质同象替代(王濮等, 1987) 根据研究区样品中独居石的电子探针测试数据, ThO_2 与 REE 的含量变化成反消长关系(图 7), 说明 ThO_2 可能替代 REE。

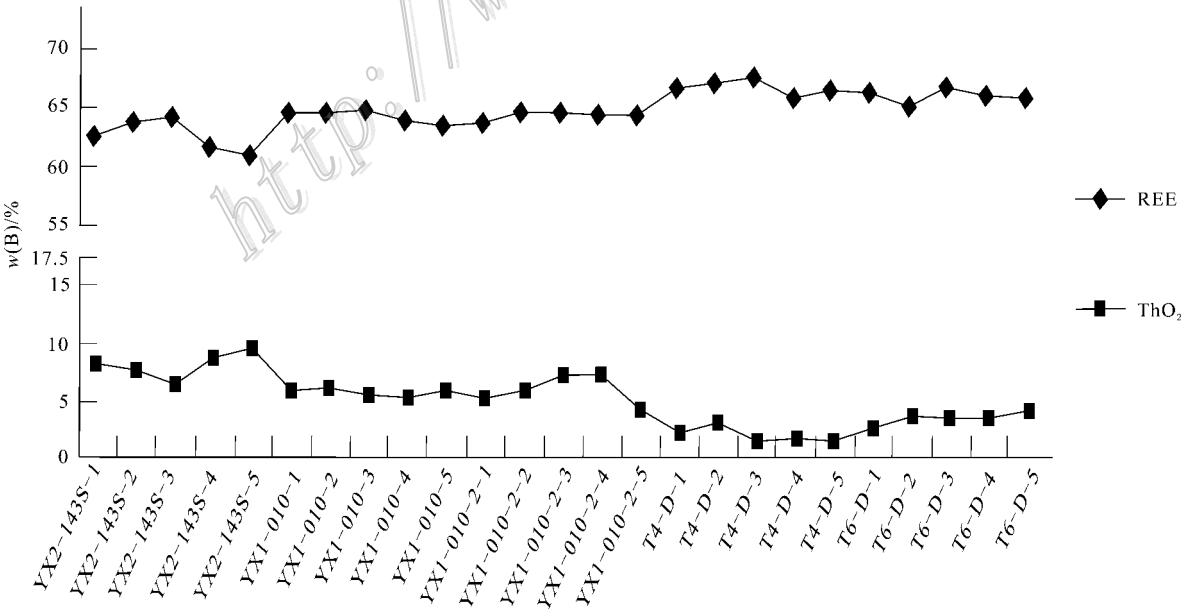


图 7 波孜果尔碱性岩中独居石中 ThO_2 和 REE 化学成分变化图解

Fig. 7 Diagrams of ThO_2 and REE of monazite from Boziguoer alkali rocks

不同成因独居石的化学成分存在着明显的差异:如热液成因的独居石中 La 和 Ce 的含量高, $w(\text{La} + \text{Ce}) > 40\%$, 产于花岗岩和伟晶岩中的独居石, $w(\text{La}) < 5\%$, $w(\text{Ce}) < 20\%$, Sm、Th 含量高 ($w(\text{Sm}) > 5\%$, $w(\text{Th}) > 6\%$) (洪文兴等, 2000), 不同阶段 HREE 和 LREE 的分配也是不一样的, 在岩浆期和伟晶岩期 La/Nd 比值均小于 1.6, 但到热液期 La/Nd 比值一般在 1.6 ~ 4.5 之间 (王濮等, 1987), 研究区产出的独居石 $w(\text{Ce}_2\text{O}_3)$ 为 33.81% ~ 38.12%, $w(\text{La}_2\text{O}_3)$ 为 16.24% ~ 20.65%, $w(\text{Nd}_2\text{O}_5)$ 为 4.64% ~ 9.81%。 $w(\text{La} + \text{Ce}) > 40\%$, La/Nd 比值为 1.6 ~ 4.45, 均与前人研究结果相吻合, 由此可推断研究区中产出的独居石为热液成因。

锆石的化学式为 $\text{Zr}[\text{SiO}_4]$ 。研究区产出的锆石, $w(\text{ZrO}_2)$ 为 61.08% ~ 65.53%, 低于标准矿物值 (67.1%); $w(\text{SiO}_2)$ 为 30.88% ~ 32.1%, 也低于标准矿物值 (32.9%)。由于锆石中含有 Na、Mg、Al、Ca、Fe、Nb、Hf、Th、U 等混入物, 导致 Zr 和 Si 含量相应降低。而且不同类型岩石中 $\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2$ 比值不同, 产于碱性岩中的 $\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2$ 比值最大, 一般 > 60 (王濮等, 1987), 研究区产出的锆石, $\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2$ 比值为 112.39, 具有碱性岩的特征。

不同成因锆石中 Th、U 元素的含量及 Th/U 比值是不同的 (图 6), 岩浆锆石中 Th、U 的含量较高、 Th/U 比值较大 (一般 > 0.4) ; 而变质锆石的 Th、U 含量低、 Th/U 比值小 (一般 < 0.1) (移根旺, 2008)。本区锆石 $w(\text{Th})$ 平均为 0.31%, $w(\text{U})$ 平均为 0.52%, Th/U 比值为 0.6。 Th/U 比值 > 0.4 , 由此可推断研究区中产出的锆石为岩浆锆石。

7 结 论

(1) 含稀有、稀土和放射性元素的副矿物经常以不同共生组合的形式在碱性岩中产出, 且主要分布在石英二长闪长岩和石英二长岩中。

(2) 不同岩石中副矿物的化学元素含量有差异: 在石英二长岩中, 烧绿石的 $w(\text{CaO})$ 、 $w(\text{TiO}_2)$ 、 $w(\text{ZrO}_2)$ 、 $w(\text{U}_3\text{O}_8)$, 磷钇矿的 $w(\text{Y}_2\text{O}_3)$, 星叶石的 $w(\text{TiO}_2)$, 萤石 $w(\text{Ca})$, 氟碳铈镧矿的 $w(\text{CaO})$ 较多; 而在石英二长闪长岩中, 烧绿石的 $w(\text{Ce}_2\text{O}_3)$, 磷钇矿的 $w(\text{REE})$, 星叶石的 $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 、 $w(\text{Rb}_2\text{O})$, 萤石的 $w(\text{Ce})$ 、 $w(\text{Y})$ 和氟碳铈镧矿的 $w(\text{La}_2\text{O}_3)$ 较多。

(3) 矿物化学元素替代现象普遍: 烧绿石中的 Ca、Na 可能被 U、Th 和 REE 所替代。磷钇矿中富含 REE, 且以 HREE 为主, $w(\text{Th})$ 大于 $w(\text{U})$; 萤石中的 Ca 可能被 Y 和 Ce 替代; 锆石中产出的钍石 $w(\text{U})$ 明显高于磁铁矿中的钍石 $w(\text{U})$ 。

(4) 独居石富含 LREE, ThO_2 和 LREE 可相互替代。根据独居石中 $w(\text{La} + \text{Ce}) > 40\%$ 和 La/Nd 的比值在 1.6 ~ 4.5 之间, 推断独居石应该为热液成因。锆石中 Zr/Hf 比值在 60% 以上, 符合碱性花岗岩特征。本区锆石的 Th/U 比值为 0.6, 符合岩浆锆石 $\text{Th}/\text{U} > 0.4$ 的特点, 故本区锆石类型为岩浆锆石。

参考文献/References

- 陈富文, 李华芹, 路远发. 2002. 新疆稀有 稀土金属矿床成矿作用时空规律 [J]. 地质学报, 76(4): 565.
- 洪文兴, 朱祥坤. 2000. 独居石微粒微区成分分布的研究 [J]. 高校地质学报, 6(2): 167-172.
- 刘楚雄, 许保良, 邹天人, 路凤香, 童英, 蔡剑辉. 2004. 塔里木北缘及邻区海西期碱性岩岩石化学特征及其大地构造意义 [J]. 新疆地质, 22(1): 43-49.
- 刘春花. 2011. 新疆拜城县波孜果尔 A 型花岗岩类岩石地球化学特征 (硕士论文) [D]. 导师: 尹京武. 北京: 中国地质大学. 28 页.
- 王濮, 潘兆鲁, 翁玲宝, 等. 1987. 系统矿物学 [M]. 北京: 地质出版社.
- 移根旺. 2008. 锆石成因矿物学研究 [J]. 中国水运, 8(6): 259-260.
- 袁忠信, 白鸽. 2001. 中国内生稀有稀土矿床的时空分布 [J]. 矿床地质, 20(4): 347-353.
- 邹天人, 徐珏, 陈伟十, 夏凤荣. 2002. 塔里木盆地北缘碱性岩型稀有稀土矿床 [J]. 矿床地质, 21(增刊): 845-848.
- 邹天人, 李庆昌. 2004. 中国新疆稀有及稀土金属矿床 [M]. 北京: 地质出版社. 152, 239.