

新疆拜城县波孜果尔 A 型花岗岩类矿物学 特征及岩浆形成的温度条件

刘春花¹, 尹京武², 吴才来¹, 蔡佳¹, 邵兴坤², 杨海涛², 郝源红¹, 雷敏¹,
徐海明³, 王军³

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学, 北京 100083; 3. 中国地质科学院
矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要:新疆拜城县波孜果尔 A 型花岗岩类为富含铌、钽、锆等有用元素的含矿岩体。通过偏光显微镜、电子探针 (EPMA) 化学成分分析、电子探针背散射 (BSE) 对波孜果尔 A 型花岗岩类的矿物学特征进行了研究, 并对岩浆形成的温度条件与构造背景进行了讨论。结果表明, 波孜果尔 A 型花岗岩类包括霓石钠闪石英碱性长石正长岩、霓石钠闪碱性长石花岗岩、黑云母碱性长石正长岩 3 种岩石类型。主要造岩矿物包括石英、钠长石、钾长石、霓石、钠铁闪石和铁叶云母。副矿物包括锆石、烧绿石、钽石、萤石、独居石、氟碳铈镧矿、磷钇矿等。岩浆平均温度 832~839℃, 形成于非造山的板内构造环境, 且具高温、无水、低氧逸度的成岩特点。

关键词:碱性岩; A 型花岗岩类; 矿物学; 波孜果尔

中图分类号: P588.12⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)04-0589-14

Mineralogy and temperature of magma generation for A-type granitoids in Boziguoer, Baicheng County, Xinjiang

LIU Chun-hua¹, YIN Jing-wu², WU Cai-lai¹, CAI Jia¹, SHAO Xing-kun², YANG Hai-tao²,
GAO Yuan-hong¹, LEI Min¹, XU Hai-ming³ and WANG Jun³

(1. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
3. Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract: The Boziguoer A-type granitoids in Baicheng County of Xinjiang are ore-bearing rocks with abundant useful elements such as Nb, Ta and Zr. The petrological and mineralogical characteristics of the A-type granitoids were investigated on the basis of observation under polarized microscope, chemical analysis and detailed BSE images using EPMA, followed by the discussion on the *p-T* conditions of A-type magma generation and the tectonic setting. The results indicate that these A-type granitoids could be divided into three types, namely aegirine arfvedsonite quartz alkali feldspar syenite, aegirine arfvedsonite alkali feldspar granite and biotite alkali feldspar syenite. The major rock-forming minerals are quartz, albite, K-feldspar, aegirine, arfvedsonite and siderophyllite, whereas the accessory minerals include mainly zircon, pyrochlore, thorite, fluorite, monazite, bastnaesite and xenotime. The average temperatures of the magma are 832~839℃. A-type granitoids might have been formed in an anorogenic intraplate tectonic setting by which they generally show such features as high-

收稿日期: 2011-12-18; 修订日期: 2012-05-17

基金项目: 国家专项 (SinoProbe-05-05); 自然科学基金项目 (40921001, 49772106, 40472034, 40672049); 中国地调局项目 (1212010918007, 1212010818090, 1212010611803, 1212010711816, 1212011120160)

作者简介: 刘春花 (1985-), 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事火成岩岩石学研究, E-mail: chunhua91052@126.com

temperature, anhydrous nature and low fugacity.

Key words: alkaline rocks; A-type granitoids; mineralogy; Boziguoer

波孜果尔位于塔里木盆地北缘西南天山晚古生代聚合带(图 1a),行政区划隶属新疆维吾尔自治区拜城县管辖,与拜城县城正北直距约 43 km,海拔高(3 180~4 169 m),地形陡峻,山路崎岖,交通困难,地质工作程度较低。解放后新疆地勘单位先后在本区进行过 1:100 万、1:20 万、1:50 万地质调查和矿产评价等工作,初步查明了区域地层格架、大地构造背景、岩浆岩及区域矿产分布概况,并圈定了多处综合异常区。1991~2000 年,邹天人等(2004, 2006)对区内碱性岩及其有关的成矿作用进行了初步研究。徐海明等(2009)^①开展了“波孜果尔铋、钽矿地质详查”工作,基本查明了波孜果尔碱性花岗岩含矿岩体的规模、产状、品位、时空分布特征以及与铋、钽矿化的关系。然而,对于波孜果尔碱性花岗岩体岩浆形成的温度条件和岩石矿物组成等,前人尚未做过详细研究,而这些方面的研究对确定岩石成因和矿床成因起着非常重要的作用。基于此,本文结合偏光显微镜观察、电子探针(EPMA)化学成分分析、电子探针背散射(BSE)图像观察等对波孜果尔碱性花岗岩的矿物学特征进行了细致研究,确定了该岩体为 A 型花岗岩,并对岩浆形成的温度条件进行了估算。

1 地质背景

波孜果尔位于塔里木-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(图 1a)。区内地层属天山地层区、南天山分区、哈里克套小区。区内出露的地层主要为古生代志留纪穷库什太组(S_3q)、石炭纪干草湖组(C_1g)和二叠纪小提坎里克组(P_1x)。

区内火山岩较为发育,火山活动大致可分为志留世旋回、早石炭世旋回和早二叠世旋回 3 个旋回。区内的岩浆岩不甚发育,仅在区域中部的波孜果尔发育海西晚期的碱性花岗岩体,为 A 型花岗岩,该岩体(图 1b)为小岩株,呈近东西向展布,东西长约 4.45 km,南北宽 0.4~1.2 km(平均约 0.8 km 左右),面积约 3.56 km²,岩体长轴走向 295°,倾角向外倾 70°左右。该岩体主要侵入志留纪穷库什太组的大

理岩中,与区内的铋、钽矿床成矿关系极为密切。不仅铋、钽元素含量高,而且铀、钍、稀土、锆、铷等元素含量也较高,为一含矿岩体。

区内发育两个小型褶皱。褶皱①是位于 F1 断层南侧的小型背斜,背斜轴呈近东西向展布,轴面倾角近于直立,规模 16 km 以上,南翼地层倾向南,倾角 70°左右,北翼地层倾向北,倾角 40°~70°不等。褶皱②是位于 F3 和 F4 断层之间的小型背斜,背斜轴呈北东东至南西西向展布,倾向南,倾角 75°~80°,规模大于 12 km,南翼倾向 170°~180°,倾角 30°左右,北翼倾向 350°~360°,倾角 50°左右。

近东西向的 F1 和 F2 断裂(阿克牙伊利亚克塔格断裂)为区内的主要断裂,长 160 km 以上,断层面产状倾向北,倾角 70°左右,沿断裂带断续分布较多构造破碎岩,并形成较多绿泥石化、褐铁矿化等蚀变现象,为压性断层,有多期次活动的特点。北东东-南西西向 F3 和 F4 断裂主要分布于区内南侧一带,规模较小,沿断层带断续分布较多构造破碎岩,断层面倾向北,倾角 60°左右,为压扭性断层。北东-南西向 F5 断裂一般为 F1、F2 主干断裂的次级小断裂,规模较小,断层平直,断层破碎带不发育,为压扭性断层。

围岩发生绿帘石化、绿泥石化及萤石化。绿帘石呈细粒状或隐晶质,集合体呈细脉状或薄膜状分布,常与绿泥石共生,并伴有绢云母、碳酸盐等矿物。绿泥石呈片状、纤维状集合体分布。萤石多呈他形粒状、团块状或粗细不等的脉状,沿岩石裂隙交代充填,为热液作用晚期的产物,颜色多为紫色、黑紫色、黑色等。

2 分析方法

电子探针测试在中国地质大学(北京)电子探针室完成,仪器型号 EPMA-1600,测试电压 15 kV,电流 10 nA,束斑 1 μm,标准样品为 Si、Al(斜长石)、Ti(金红石)、Fe(铁铝榴石)、Mn(蔷薇辉石)、Mg(橄榄石)、Ca(方解石)、Na(钠长石)、K(透长石)等,标准样品是日本岛津公司对 EPMA-1600 电子探针的标准配置;主要氧化物的分析误差约为 1%。

① 徐海明,王军,张磊,等. 2009. 新疆拜城县波孜果尔铋、钽矿地质报告. 北京: 中国地质科学院矿产资源研究所.

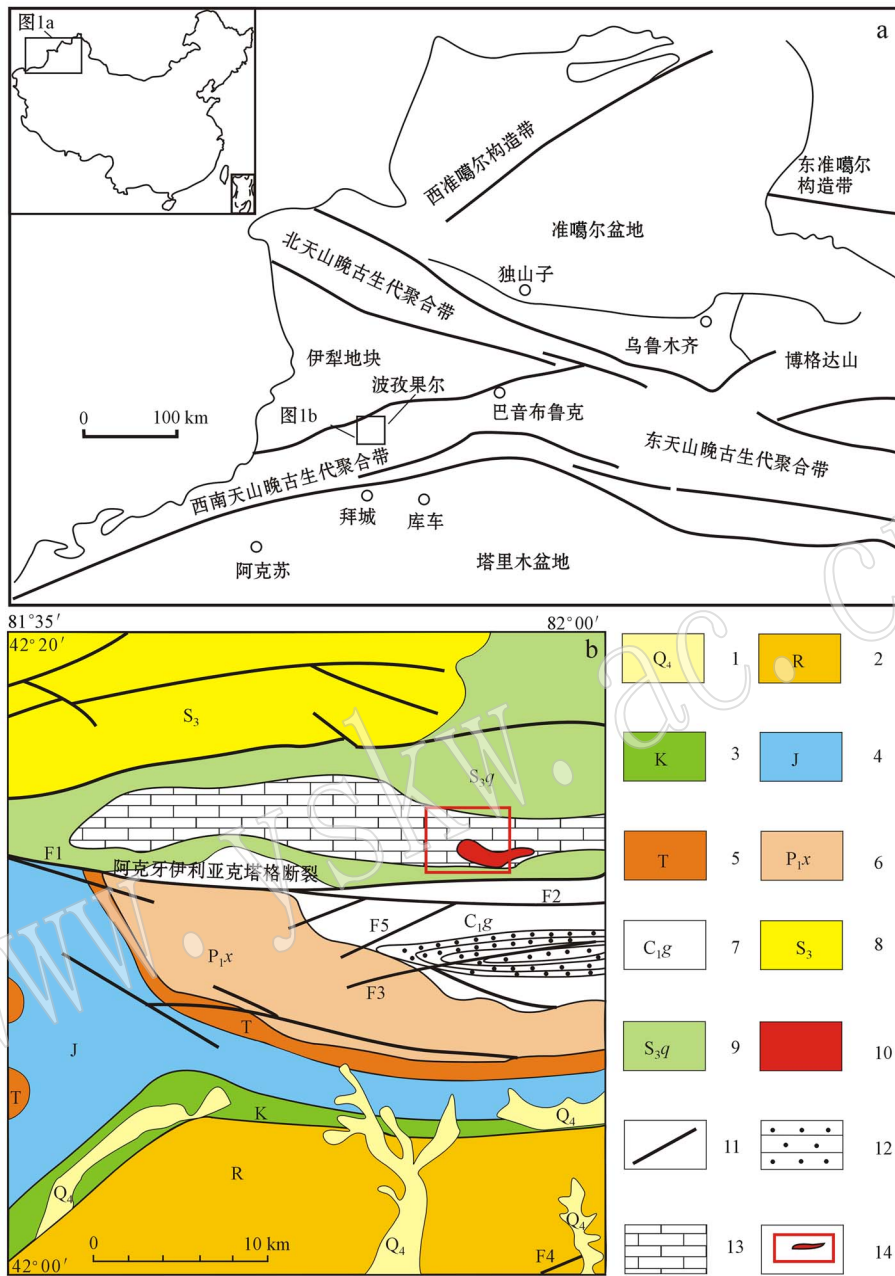


图 1 波孜果尔一带区域地质简图(a 据李向东等, 2004; b 据徐海明等, 2009)^①

Fig. 1 Regional geological map of Boziguoer area (a after Li Xiangdong *et al.*, 2004; b after Xu Haiming *et al.*, 2009)
 1—第四纪洪积层; 2—第三纪砾岩、砂岩、泥岩; 3—白垩纪砂质泥岩、粉砂岩、长英质砂岩、砾岩; 4—侏罗纪泥岩、泥质粉砂岩、泥质页岩、泥灰岩、砂岩、炭质页岩、石英砂岩、粉砂岩、砾岩、粗砂岩、煤层; 5—三叠纪砾岩、中粒砂岩、泥质粉砂岩夹粗砂岩、细砾岩; 6—二叠纪小提坎立克组酸性熔岩、凝灰岩及碎屑岩建造; 7—石炭纪干草湖组浅—滨海相碳酸盐及碎屑岩建造; 8—志留纪大理岩、灰岩、石英片岩、混合岩、变质粉砂岩; 9—志留纪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—海西中晚期 A 型花岗岩; 11—断层; 12—砾岩; 13—大理岩; 14—研究区

1—Quaternary diluvial layer; 2—Tertiary conglomerate, glutenite, sandstone and mudstone; 3—Cretaceous sandy shale, siltstone, felsic sandstone and conglomerate; 4—Jurassic mudstone, argillaceous siltstone, argillaceous shale, marl, sandstone, carbonaceous shale, quartz sandstone, siltstone, conglomerate, grit stone and coalbed; 5—Triassic conglomerate, medium-grained sandstone and argillaceous siltstone intercalated with grit stone and conglomerates; 6—Permian Xiaotikanlike Formation acidic lava, tuff and clastic rock; 7—Carboniferous Gancaohu Formation shallow and marine carbonate and clastic rock; 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 Hercynian A-type granites; 11—fault; 12—conglomerate; 13—marble; 14—study area

① 徐海明, 王 军, 张 磊, 等. 2009. 新疆拜城县波孜果尔泥、钼矿地质报告. 北京: 中国地质科学院矿产资源研究所.

3 岩石学特征

波孜果尔 A 型花岗岩类按照 QAP 的分类命名原则, 岩石类型分为 3 种, 自岩株顶部向下依次为: 黑云母碱性长石正长岩→霓石钠闪石英碱性长石正长岩→霓石钠闪碱性长石花岗岩。岩石学特征如下:

霓石钠闪石英碱性长石正长岩(图 2a、b, 图 3a、b), 灰白色, 细粒结构, 块状构造。主要矿物钠长石(58%~70%)粒度 0.1 mm×0.2 mm~0.5 mm×0.8 mm; 钾长石(14%~17%)粒度 0.1 mm×0.2 mm~0.4 mm×0.8 mm; 石英(5%~8%)粒度 0.1~0.4 mm。次要矿物钠铁闪石(8%~10%)粒度 0.2 mm×0.3 mm~0.7 mm×1 mm; 霓石(2%~5%)粒度 0.1 mm×0.1 mm~0.3 mm×0.5 mm; 黑云母(1%~2%)粒度 0.1 mm×0.2 mm~0.2 mm×0.5 mm。

霓石钠闪碱性长石花岗岩(图 2c、d, 图 3c、d、e), 灰白色, 细粒结构, 块状构造。主要矿物钠长石(35%

~45%)粒度 0.1 mm×0.2 mm~0.3 mm×0.7 mm; 钾长石(22%~25%)粒度 0.1 mm×0.2 mm~0.3 mm×0.6 mm; 石英(22%~25%)粒度 0.1~0.3 mm。次要矿物钠铁闪石(10%~12%)半自形短柱状, 粒度 0.2 mm×0.3 mm~0.8 mm×1.2 mm; 霓石(1%~3%)半自形柱状, 粒度 0.1 mm×0.2 mm~0.4 mm×0.7 mm。

黑云母碱性长石正长岩(图 2e、f, 图 3f、g), 肉红色, 细粒结构, 块状构造。主要矿物钠长石(40%~55%)粒度 0.2 mm×0.4 mm~1 mm×1.3 mm; 钾长石(26%~30%)粒度 0.3 mm×0.5 mm~1.0 mm×1.5 mm, 与钠长石构成正条纹长石(图 3g); 石英(10%~14%)粒度 0.2~0.8 mm。次要矿物黑云母(7%~12%)(图 2e、图 3f、i), 为铁叶云母, 粒度 0.15 mm×0.2 mm~1.2 mm×1.5 mm; 钠铁闪石(2%~4%)粒度 0.2 mm×0.3 mm~0.4 mm×0.5 mm。3 种岩石副矿物均主要包括锆石、星叶石、烧绿石、钼石、萤石、独居石、氟碳铈镧矿、磷钇矿等。

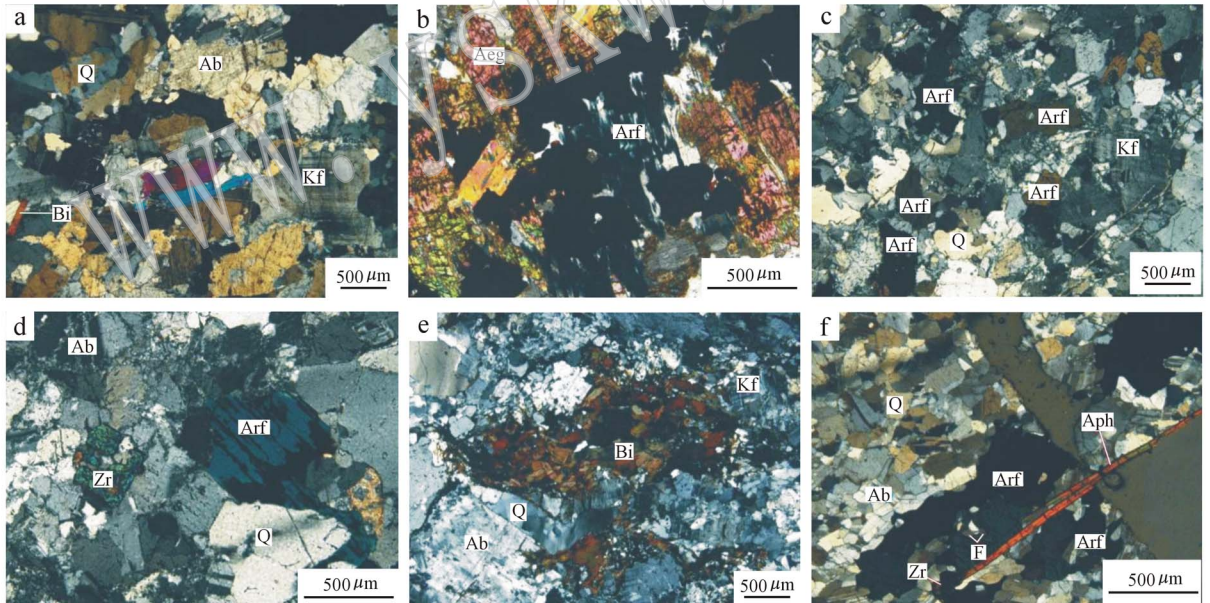


图 2 A 型花岗岩类正交偏光显微镜照片

Fig. 2 Photomicrographs of A-type granitoids (crossed nicols)

a、b—霓石钠闪石英碱性长石正长岩, 半自形细粒结构, 霓石与钠铁闪石共生; c、d—霓石钠闪碱性长石花岗岩, 花岗结构, 钠铁闪石呈蓝色, 锆石为半自形-自形; e、f—黑云母碱性长石正长岩, 叶片状的铁叶黑云母呈团簇状分布, 叶状红褐色星叶石, 副矿物萤石、锆石; Q—石英;

Ab—钠长石; Kf—钾长石; Bi—黑云母; Aeg—霓石; Arf—钠铁闪石; Zr—锆石; F—萤石; Aph—星叶石

a, b— aegirine arfvedsonite quartz alkali feldspar syenite with subhedral fine-grained texture, aegirine associated directly with arfvedsonite; c, d— aegirine arfvedsonite alkali feldspar granite with granitic texture, and the interference color of arfvedsonite being blue under crossed nicols, zircon showing subhedral-euhedral shape; e, f— biotite alkali feldspar syenite, foliated siderophyllite distributed in clusters, reddish brown astrophyllite displaying also foliated shape, zircon and fluorite both being accessory minerals; Q— quartz; Ab— albite; Kf— K-feldspar; Bi— biotite; Aeg— aegirine;

Arf— arfvedsonite; Zr— zircon; F— fluorite; Aph— astrophyllite

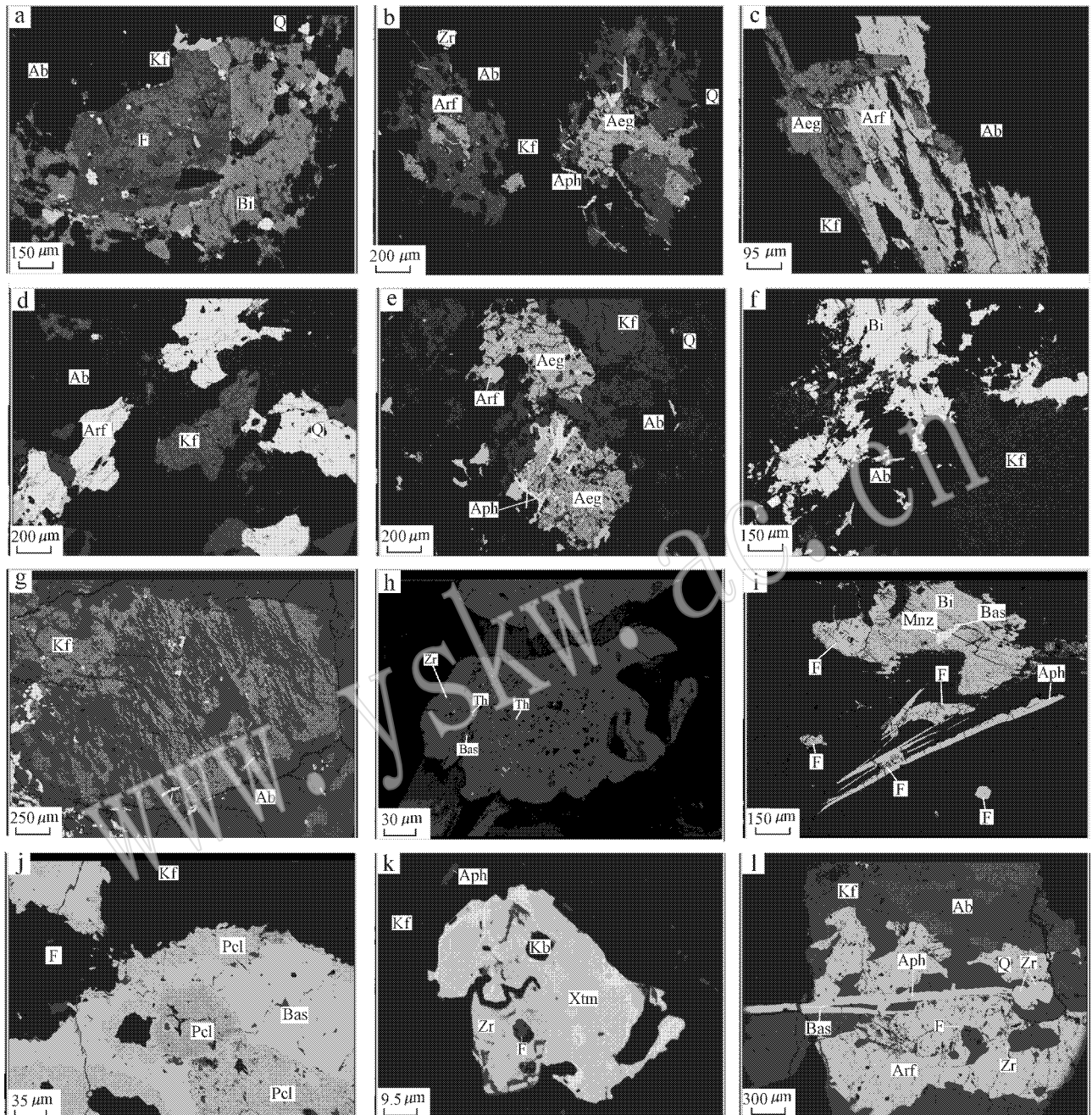


图 3 A 型花岗岩类 BSE 图像

Fig. 3 BSE images of A-type granitoids

a, b—霓石钠闪石英碱性长石正长岩, 霓石与钠铁闪石共生, 霓石先于钠铁闪石结晶; c, d, e—霓石钠闪碱性长石花岗岩, 霓石与钠铁闪石共生; f, g—黑云母碱性长石正长岩, 正条纹长石发育; h, i, j, k, l—副矿物, 锆石 (Zr)、烧绿石 (Pel)、钍石 (Th)、萤石 (F)、独居石 (Mnz)、氟碳铈镧矿 (Bas)、磷钇矿 (Xtm); Q—石英; Ab—钠长石; Kf—钾长石; Bi—黑云母; Aeg—霓石; Arf—钠铁闪石; Aph—星叶石

a, b—aeigrine arfvedsonite quartz alkali feldspar syenite, aegirine associated with arfvedsonite and aegirine crystallized earlier than arfvedsonite; c, d, e—aeigrine arfvedsonite alkali feldspar granite, aegirine associated with arfvedsonite; f, g—biotite alkali feldspar syenite, with well-developed perthite; h, i, j, k, l—accessory minerals: zircon, pyrochlore, thorite, fluorite, monazite, bastnaesite and xenotime; Q—quartz; Ab—albite;

Kf—K-feldspar; Bi—biotite; Aeg—aeigrine; Arf—arfvedsonite; Aph—astrophyllite

4 矿物学特征

4.1 钾长石

钾长石是波孜果尔 A 型花岗岩类的主要造岩矿物之一,有正长石、微斜长石和条纹长石 3 种。正长石(Orthoclase),负低突起,干涉色一级灰-灰白。微斜长石(Microcline)(图 2a、c、e),半自形-他形粒状,解理夹角近 90°,白色,薄片无色,负低突起,干涉色一级灰-灰白,格子状双晶发育。条纹长石(Perthite)(图 3g),钾长石为主晶,钠长石为客晶,为正条纹长

石。黑云母碱性长石正长岩中钾长石以正长石、微斜长石为主,钾长石的 K_2O 含量 16.39% ~ 16.79% (表 1), Na_2O 含量 0.13% ~ 0.33%, CaO 含量 0.02% ~ 0.23%。霓石钠闪碱性长石花岗岩中钾长石以正长石、微斜长石为主,钾长石的 K_2O 含量 16.06% ~ 16.50%, Na_2O 含量 0 ~ 0.47%, CaO 含量 0 ~ 0.12%。霓石钠闪石英碱性长石正长岩中钾长石 3 种长石均有,钾长石的 K_2O 含量 16.00% ~ 16.85%, Na_2O 含量 0.20% ~ 0.52%, CaO 含量 0 ~ 0.16%。钾长石的端员组分主要为 Or, Ab, An 端员组分含量很低(表 1)。

表 1 钾长石的化学成分

Table 1 Chemical composition of K-feldspar

$w_B/\%$

岩性	黑云母碱性长石正长岩						霓石钠闪碱性长石花岗岩									
	YX4-207			YX1-010			YX1-004		YX3-162				YX3-201			
	1	2	3	1	2	1	2	1	2	3	4	1	2	3		
SiO ₂	63.95	64.66	64.15	64.55	64.08	64.71	64.25	64.93	65.18	63.75	64.32	64.60	64.09	64.53		
TiO ₂											0.02					
Al ₂ O ₃	17.32	17.92	17.76	17.60	17.80	18.35	17.94	17.64	17.37	18.23	17.86	17.92	17.98	17.31		
FeO ^T	0.72	0.21	0.51		0.09		0.24	0.39	0.26	0.39	0.06	0.13	0.39	0.58		
MnO	0.01				0.10		0.08		0.11	0.05	0.07		0.10			
MgO	0.01	0.12		0.08							0.05			0.05		
CaO	0.13	0.07	0.02	0.07	0.23	0.16	0.15	0.02			0.12	0.09		0.05		
Na ₂ O	0.23	0.25	0.24	0.13	0.33	0.30	0.27	0.11	0.25		0.21	0.23	0.42	0.47		
K ₂ O	16.55	16.42	16.43	16.79	16.57	16.39	16.69	16.21	16.18	16.50	16.13	16.21	16.31	16.06		
Σ	98.92	99.65	99.11	99.22	99.20	99.91	99.62	99.30	99.35	98.92	98.84	99.18	99.29	99.05		
An	0.64	0.35	0.10	0.34	1.12	0.79	0.73	0.10	0.00	0.00	0.61	0.45	0.00	0.25		
Ab	2.06	2.25	2.17	1.16	2.90	2.69	2.38	1.02	2.29	0.00	1.93	2.10	3.77	4.25		
Or	97.30	97.40	97.73	98.50	95.98	96.52	96.89	98.88	97.71	100.00	97.46	97.44	96.23	95.50		
岩性	霓石钠闪石英碱性长石正长岩															
样号	YX2-171S				YX1-054		YX1-057		YX3E-008		YX3E-003		YX2-143S		YX4-191	
	1	2	3	4	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
SiO ₂	64.25	64.65	64.34	64.27	64.46	64.28	64.42	64.65	64.28	64.24	63.81	64.37	64.21	64.63	64.53	64.31
TiO ₂					0.04	0.05			0.09				0.05			0.12
Al ₂ O ₃	17.69	17.90	17.56	17.47	18.04	17.80	17.96	18.06	17.86	17.99	18.32	17.49	17.95	17.90	18.11	17.99
FeO ^T	0.49	0.21	0.57	0.38	0.21		0.21	0.14		0.40	0.20	0.35	0.24	0.26	0.45	0.27
MnO	0.16	0.06			0.09	0.21		0.02	0.33		0.04		0.06			0.05
MgO	0.05				0.03	0.04					0.05	0.04	0.01			
CaO	0.09	0.06	0.15	0.11	0.02	0.09	0.03	0.05	0.10	0.15	0.10	0.04	0.15		0.13	0.16
Na ₂ O	0.32	0.46	0.29	0.52	0.21	0.30	0.20	0.23	0.24	0.21	0.24	0.44	0.30	0.28	0.43	0.27
K ₂ O	16.07	16.14	16.00	16.04	16.27	16.54	16.71	16.48	16.64	16.85	16.48	16.31	16.19	16.36	16.21	16.42
Σ	0.45	99.48	98.91	98.79	99.37	99.31	99.53	99.63	99.54	99.84	99.24	99.04	99.16	99.43	99.86	99.59
An	2.92	0.30	0.76	0.55	0.10	0.44	0.15	0.25	0.49	0.73	0.50	0.20	0.75	0.00	0.64	0.79
Ab	96.62	4.14	2.66	4.67	1.92	2.67	1.78	2.07	2.13	1.85	2.15	3.93	2.72	2.54	3.85	2.42
Or	99.12	95.56	96.58	94.78	97.98	96.89	98.07	97.68	97.37	97.43	97.35	95.87	96.53	97.46	95.51	96.79

注: 据路远发(2004)GeoKit 软件计算,空白表示元素含量在电子探针的检测线之下,未检测出元素含量,下同。

4.2 钠长石

波孜果尔 A 型花岗岩类的钠长石含量较高。呈半自形柱状、板状，负低突起，干涉色一级灰~黄白，斜消光，少量的环带，聚片双晶发育。黑云母碱性长石正长岩中钠长石 K_2O 含量 0.05%~0.48% (表 2)， Na_2O 含量 10.25%~11.45%， CaO 含量 0.07%~0.26%。霓石钠闪碱性长石花岗岩中钠长

石 K_2O 含量 0.08%~0.71%， Na_2O 含量 10.83%~11.43%， CaO 含量 0.05%~0.14%。霓石钠闪石英碱性长石正长岩中钠长石 K_2O 含量 0.05%~0.58%， Na_2O 含量 11.17%~11.76%， CaO 含量 0.05%~0.15%。可见钠长石基本不含或含极少量的 CaO 、 K_2O ，钠长石端员组分主要为钠长石 (Ab) 分子 (表 2)。

表 2 钠长石的化学成分

$w_B/\%$

Table 2 Chemical composition of albite

岩性	黑云母碱性长石正长岩								霓石钠闪碱性长石花岗岩							
	YX4-207			YX1-010			YX1-004		YX3-162			YX3-201				
	1	2	3	1	2	1	2	1	2	3	1	2	3	4		
SiO ₂	68.64	68.20	68.45	68.43	68.40	68.54	68.21	67.88	68.25	67.61	68.59	68.48	67.95	68.57		
TiO ₂					0.15			0.01	0.17							
Al ₂ O ₃	19.03	19.16	19.26	19.14	19.21	19.14	19.03	19.15	19.15	18.93	19.14	18.80	19.07	19.07		
FeO ^T	0.68	0.37	0.33	0.12	0.32	0.06	0.13	0.53	0.34	0.60	0.51	0.42	0.50	0.39		
MnO	0.06	0.06	0.03			0.09	0.09	0.02		0.03			0.15	0.10		
MgO	0.02	0.03	0.01							0.06		0.06				
CaO	0.07	0.08	0.13	0.09	0.20	0.19	0.26	0.05	0.08	0.09	0.14	0.10	0.09	0.05		
Na ₂ O	10.71	11.45	10.94	11.34	10.25	11.00	11.44	11.29	11.23	11.41	11.10	11.09	11.43	10.83		
K ₂ O	0.11	0.06	0.07	0.12	0.48	0.08	0.05	0.09	0.10	0.25	0.10	0.08	0.13	0.71		
Σ	99.32	99.41	99.22	99.24	99.01	99.10	99.21	99.02	99.32	98.98	99.58	99.03	99.36	99.72		
An	0.36	0.38	0.65	0.43	1.04	0.94	1.24	0.24	0.39	0.43	0.69	0.49	0.43	0.24		
Ab	98.97	99.27	98.93	98.88	96.01	98.59	98.48	99.24	99.03	98.16	98.73	99.04	98.83	95.63		
Or	0.67	0.34	0.42	0.69	2.96	0.47	0.28	0.52	0.58	1.42	0.59	0.47	0.74	4.13		

岩性	霓石钠闪石英碱性长石正长岩																	
样号	YX2-171S				YX1-054				YX1-057		YX3E-008		YX3E-003		YX2-143S		YX4-191	
点号	1	2	3	4	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
SiO ₂	68.04	68.23	67.90	68.28	68.28	68.41	68.42	68.56	68.10	68.11	68.38	68.34	68.30	67.98	68.19	67.65		
TiO ₂	0.09			0.25	0.01				0.06		0.07			0.08	0.08			
Al ₂ O ₃	19.21	18.75	19.18	18.96	19.37	19.28	19.27	19.28	19.27	19.07	19.33	19.04	19.21	19.17	19.19	19.13		
FeO ^T	0.15		0.29	0.14	0.03			0.06	0.36	0.62	0.17	0.14	0.25	0.32	0.61	0.51		
MnO	0.03	0.11			0.07		0.01	0.08				0.02		0.02	0.08	0.06		
MgO								0.12	0.02	0.02	0.04	0.05						
CaO	0.11	0.05	0.12	0.12	0.12	0.05	0.05	0.15	0.11	0.05	0.05	0.07	0.10	0.06	0.09	0.05		
Na ₂ O	11.17	11.76	11.4	11.41	11.32	11.52	11.38	11.43	11.33	11.20	11.57	11.39	11.45	11.40	11.26	11.24		
K ₂ O	0.21	0.15	0.22	0.05	0.17	0.15	0.11	0.14	0.05	0.21	0.12	0.06	0.16	0.16	0.05	0.58		
Σ	99.01	99.05	99.11	99.21	99.37	99.41	99.24	99.82	99.30	99.28	99.73	99.11	99.47	99.19	99.55	99.22		
An	0.53	0.23	0.57	0.58	0.58	0.24	0.24	0.71	0.53	0.24	0.24	0.34	0.48	0.29	0.44	0.24		
Ab	98.25	98.94	98.18	99.14	98.45	98.92	99.13	98.49	99.18	98.54	99.09	99.32	98.62	98.80	99.27	96.49		
Or	1.22	0.83	1.25	0.29	0.97	0.85	0.63	0.79	0.29	1.22	0.68	0.34	0.91	0.91	0.29	3.28		

注：据路远发(2004)GeoKit 软件计算。

4.3 钠铁闪石

钠铁闪石 (图 2b、c、d、f，图 3b、c、d、e、l) 是波孜果尔 A 型花岗岩类的主要铁镁矿物。半自形板状，多色性明显，呈蓝色至褐绿色，正高突起，干涉色一级灰至黄，斜消光，负延性。沿 (100) 双晶结合面具简单双

晶和聚片双晶。部分颗粒可见近 56° 解理。用阴离子法以氧离子数 23 为基准计算出角闪石的阳离子系数见表 3。黑云母碱性长石正长岩中角闪石 SiO₂ 的含量 49.79%~50.45%，MgO 含量 0.46%~0.72%， Na_B 为 1.72~1.82， $(Na+K)_A$ 为 1.10~

表 3 钠铁闪石的化学成分

 $w_B/\%$

Table 3 Chemical composition of arfvedsonite

岩性	黑云母碱性长石正长岩					霓石钠闪碱性长石花岗岩								
	YX4-207					YX3-201					YX3-162			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4
SiO ₂	50.13	50.15	49.79	50.45	50.36	51.03	51.19	50.80	50.82	50.90	51.51	51.77	51.50	51.73
TiO ₂	0.74	0.86	0.38	0.36	0.42	0.68	0.39	0.63	0.34	0.59	0.69	0.70	0.66	0.58
Al ₂ O ₃	0.82	0.71	0.98	0.96	1.11	0.78	0.77	0.80	0.93	0.74	0.81	0.92	0.88	0.95
FeO	32.57	33.87	33.76	33.55	32.95	31.08	31.72	30.91	31.10	31.65	31.30	31.33	30.90	31.23
MnO	1.18	0.59	0.82	0.80	0.60	1.40	1.07	1.22	1.47	1.42	1.07	0.98	1.23	1.02
MgO	0.46	0.62	0.59	0.62	0.72	0.07		0.22			0.06	0.10	0.08	0.06
CaO	0.52	0.28	0.25	0.16	0.13	0.24	0.06	0.16	0.24		0.06	0.05	0.15	0.08
Na ₂ O	8.12	8.23	7.80	7.95	8.44	9.36	9.66	9.19	9.33	9.11	9.12	8.85	8.80	9.17
K ₂ O	1.69	1.70	1.98	1.66	1.54	1.53	1.84	2.40	1.91	2.28	1.49	1.74	1.79	1.49
Si _T *	8.16	8.13	8.13	8.19	8.17	8.26	8.27	8.24	8.26	8.25	8.31	8.32	8.32	8.32
Al _T	-0.16	-0.13	-0.13	-0.19	-0.17	-0.26	-0.27	-0.24	-0.26	-0.25	-0.31	-0.32	-0.32	-0.32
Al _C	0.32	0.26	0.32	0.37	0.38	0.41	0.42	0.39	0.43	0.39	0.47	0.49	0.49	0.50
Fe _C ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti _C	0.09	0.10	0.05	0.04	0.05	0.08	0.05	0.08	0.04	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07
Mg _C	0.11	0.15	0.14	0.15	0.17	0.02	0.00	0.05	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01
Fe _C ²⁺	4.44	4.48	4.49	4.44	4.39	4.21	4.29	4.19	4.23	4.29	4.22	4.21	4.17	4.20
Mn _C	0.04					0.19	0.15	0.17	0.20	0.19	0.15	0.13	0.17	0.14
Fe _B ²⁺	0.00	0.10	0.13	0.12	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn _B	0.12	0.08	0.11	0.11	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca _B	0.09	0.05	0.04	0.03	0.02	0.04	0.01	0.03	0.04	0.00	0.01	0.01	0.03	0.01
Na _B	1.79	1.77	1.72	1.74	1.82	1.96	1.99	1.97	1.96	2.00	1.99	1.99	1.97	1.99
Na _A	0.77	0.82	0.75	0.76	0.84	0.98	1.04	0.92	0.98	0.86	0.86	0.77	0.78	0.87
K _A	0.35	0.35	0.41	0.34	0.32	0.32	0.38	0.50	0.40	0.47	0.31	0.36	0.37	0.31

岩性	霓石钠闪石英碱性长石正长岩														
	YX2-171S					YX4-191					YX2-143S				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
SiO ₂	50.33	50.19	50.10	50.88	50.94	48.61	48.79	49.31	48.78	47.19	50.09	50.30	49.88	49.90	49.99
TiO ₂	0.36	0.24	0.10	0.26	0.49	0.76	0.87	0.62	0.75	0.35	0.11	0.38	0.38	0.47	0.13
Al ₂ O ₃	0.77	0.88	0.90	0.94	0.95	1.39	1.51	1.42	1.61	1.89	1.09	0.97	0.94	0.99	1.12
FeO	33.78	33.19	33.69	33.40	32.33	34.50	33.09	34.36	33.60	36.92	33.76	34.08	34.08	34.35	34.41
MnO	0.84	1.00	1.23	0.90	1.03	1.02	1.79	1.18	1.40	0.64	0.89	0.98	0.70	0.46	0.61
MgO					0.03	0.64	0.57	0.69	0.60	0.71	0.14		0.06	0.14	0.11
CaO	0.07	0.15	0.08	0.12		1.52	1.48	1.64	1.54	0.82	0.05	0.06	0.20	0.18	0.12
Na ₂ O	8.66	8.71	8.70	8.60	9.24	6.53	6.87	6.45	7.02	6.83	8.18	8.41	8.35	8.24	8.01
K ₂ O	1.84	1.87	1.84	1.86	1.49	1.20	1.10	1.16	1.34	0.94	1.78	1.74	1.61	1.70	1.60
Si _T *	8.20	8.20	8.18	8.23	8.24	7.97	7.98	8.01	7.96	7.82	8.19	8.17	8.16	8.15	8.18
Al _T	-0.20	-0.20	-0.18	-0.23	-0.24	0.03	0.02	-0.01	0.04	0.18	-0.19	-0.17	-0.16	-0.15	-0.18
Al _C	0.35	0.37	0.35	0.41	0.42	0.24	0.28	0.28	0.27	0.19	0.40	0.36	0.35	0.34	0.40
Fe _C ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.03	0.09	0.00	0.00	0.00
Ti _C	0.04	0.03	0.01	0.03	0.06	0.09	0.11	0.08	0.09	0.04	0.01	0.05	0.05	0.06	0.02
Mg _C	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.16	0.14	0.17	0.15	0.18	0.03	0.00	0.01	0.03	0.03
Fe _C ²⁺	4.60	4.54	4.60	4.52	4.37	4.47	4.45	4.39	4.50	4.59	4.55	4.59	4.59	4.57	4.56
Mn _C	0.01	0.06	0.03	0.04	0.14										
Fe _B ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.05	0.19	0.09	0.52	0.07	0.04	0.07	0.12	0.15
Mn _B	0.11	0.08	0.14	0.09	0.01	0.14	0.25	0.16	0.19	0.09	0.12	0.13	0.10	0.06	0.08
Ca _B	0.01	0.03	0.01	0.02	0.00	0.27	0.26	0.29	0.27	0.15	0.01	0.01	0.04	0.03	0.02
Na _B	1.88	1.89	1.85	1.89	1.99	1.37	1.44	1.36	1.45	1.24	1.80	1.82	1.80	1.78	1.74
Na _A	0.86	0.87	0.91	0.80	0.90	0.71	0.74	0.67	0.77	0.95	0.80	0.83	0.85	0.83	0.80
K _A	0.38	0.39	0.38	0.38	0.31	0.25	0.23	0.24	0.28	0.20	0.37	0.36	0.34	0.35	0.33

注: * 表示离子在晶体中所占位置, 据路远发(2004) Geokit 软件计算。

1.17. 霓石钠闪碱性长石花岗岩中的钠铁闪石 SiO_2 的含量 50.80% ~ 51.77%, MgO 含量 0 ~ 0.22%, Na_B 为 1.96 ~ 2.00, $(\text{Na} + \text{K})_A$ 为 1.13 ~ 1.42。霓石钠闪石英碱性长石正长岩中的 SiO_2 为 47.19% ~ 50.94%, MgO 为 0% ~ 0.71%, Na_B 为 1.24 ~ 1.99, $(\text{Na} + \text{K})_A$ 为 0.91 ~ 1.29。据 Leake 等(1997)的角闪石分类方案, 钠铁闪石的化学成分分类界限为: $\text{Na}_B \geq 1.34$, $(\text{Na} + \text{K})_A \geq 0.5$ 。因此, 波孜果尔 A 型花岗岩类的角闪石为钠铁闪石 (Arfvedsonite), 是富含 Fe^{2+} 的角闪石, 含少量的 TiO_2 , Fe^{2+} 部分被 Mg^{2+} 置换, Na^+ 部分被 Ca^{2+} 置换。

4.4 霓石

霓石是碱性岩最具代表性的铁镁矿物之一。波孜果尔 A 型花岗岩类不同岩石类型中霓石含量不等 (Aegirine, $\text{NaFe}[\text{Si}_2\text{O}_6]$)。霓石 (图 2b, 图 3b, c, e) 呈长柱状, 粒度较小者表现为针状, 部分颗粒见辉石式解理。手标本上霓石表现为暗绿色, 薄片呈绿色, 多色性明显, 颜色呈环带状分布, 愈近边缘颜色愈淡, 正高突起, 干涉色高达三至四级。由于霓石、透辉石、普通辉石和钙铁辉石具有系列过渡关系, 故其化学成分中含有 CaO 、 FeO 、 MgO 、 MnO 、 Al_2O_3 及少量 K_2O 、 TiO_2 等。从表 4 看出, 黑云母碱性长石正长岩中霓石的 FeO^T 含量 31.12% ~ 32.54%, MgO 含量 0 ~ 0.14%。霓石钠闪碱性长石花岗岩中霓石的 FeO^T 含量 30.66% ~ 31.61%, MgO 含量 0 ~ 0.13%。霓石钠闪石英碱性长石正长岩中霓石的 FeO^T 含量 29.76% ~ 31.15%, MgO 含量 0 ~ 0.10%。霓石极富铁贫镁, $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg}) = 0.989 \sim 1$, 并表现出富钠贫钙的化学特征, 其 Na_2O 含量 14.11% ~ 14.84%, 而 CaO 含量仅为 0 ~ 0.22%, 属钠质辉石亚类的霓石-霓辉石。

4.5 黑云母

黑云母为叶片状, 褐红色, 多色性极强, 团簇状分布 (图 2a, e, 图 3a, f, i)。用阴离子法以氧原子数为 11 计算出的黑云母阳离子数见表 5。黑云母化学式为 $\text{K}\{(\text{Mg}_{<0.67}, \text{Fe}_{>0.33})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_8](\text{OH})_2\}$, 化学成分介于金云母和铁云母之间, 其中 $\text{Mg}:\text{Fe}^{2+} < 2:1$, 波孜果尔黑云母的 $\text{Mg}:\text{Fe}^{2+} \approx 0$, 远小于 2, 铁含量极高。在黑云母分类图解 (图 4) 中落入铁叶云母区, 符合常丽华等 (2006) 总结的“铁含量高的黑云母往往产于碱性岩, 与霓石和钠铁闪石共生”的规律。

4.6 石英

波孜果尔 A 型花岗岩类的石英呈半自形到他形

粒状, 波状消光, 化学成分见表 6。

4.7 副矿物

烧绿石呈不规则粒状, 黄褐色, 正极高突起, 全消光, 结晶早于氟碳铈镧矿 (图 3j)。锆石 (图 2d, f, 图 3h, k, l) 无色 ~ 肉红色, 多自形, 少数呈半自形粒状, 粒径 0.2 ~ 0.4 mm, 结晶早于磷钇矿 (图 3k)。星叶石 (图 2f, 图 3b, e, i, k, l) 为叶片状, 粒度较大, $\{100\}$ 解理完好, 古铜黄色至黄褐色, 多色性明显, 近平行消光, 干涉色从三级绿黄到三级橙红, 常与钠铁闪石、霓石共生。萤石 (图 2f, 图 3a, i, l) 近无色且颜色分布不均, 负突起, 结晶早于星叶石 (图 3i) 和锆石 (图 3k)。钽石, 黑褐色, 正极高突起, 呈半自形-他形粒状分布于其他副矿物中, 结晶早于锆石 (图 3h)。磷钇矿 (图 3k) 呈黄褐色, 半自形柱状, 与锆石共生。氟碳铈镧矿 (图 3h, i, j, l) 常在其他副矿物中以包体形式存在, 结晶早于锆石 (图 3h)、黑云母 (图 3i) 以及星叶石 (图 3l)。独居石呈褐色、棕色, 半自形粒状, 结晶早于黑云母 (图 3i)。

5 讨论

5.1 岩浆形成的条件

目前普遍认为 A 型花岗岩形成的温度较高, 平均 800 ~ 900°C (胡建等, 2006; 汪洋, 2008, 2009; 贾小辉等, 2009; 王涛等, 2009)。王强等 (2000) 提出高分异 I 型花岗岩的形成温度较低 (均值 764°C), 而 A 型花岗岩一般大于 800°C。实验岩石学也证明了这一点 (Holtz *et al.*, 2001; Klimm *et al.*, 2003)。

5.1.1 锆元素在岩浆中的饱和浓度温度计

锆石是花岗质岩浆体系中较早结晶的副矿物, 其晶体能够在很长的地质时间上保持稳定, 锆石中 Zr 的分配系数对温度极度敏感, 而其他因素对其影响较小, 锆石饱和温度可近似代表花岗质岩石近液相线的温度, 可用来估算岩浆结晶温度。部分研究者 (Watson and Harrison, 1983; Montel, 1993; Miller *et al.*, 2003) 对不同成分岩石部分熔融产生的熔体进行了锆溶解度实验, 认为锆石的饱和程度取决于岩浆温度和岩浆成分。锆石在岩浆中的溶解度满足下述方程: $\ln D_{\text{Zr}}^{\text{Zircon}/\text{Melt}} = [-3.8 - 0.85(M - 1)] + 12900/T$, 其中 $D_{\text{Zr}}^{\text{Zircon}/\text{Melt}}$ 是锆元素在锆石和岩浆中浓度的比值, T 为开氏温度 (K), M 是阳离子含量比值, 由 $(\text{Na} + \text{K} + 2\text{Ca})/(\text{Al} \times \text{Si})$ 计算得出。Miller 等 (2003) 研究表明, 如果已知某一岩浆的主要成分及

表 4 霓石的化学成分
Table 4 Chemical composition of aegirine

 $w_B/\%$

岩性 样号 点号	霓石钠闪石英碱性长石正长岩										黑云母碱性长石正长岩				
	YX2-171S										YX4-207				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5
SiO ₂	53.09	52.44	52.96	52.69	52.75	52.65	53.23	52.97	53.16	53.04	53	52.41	52.32	52.05	52.78
TiO ₂	0.31	0.21	0.43	0.42	0.25	0.33	0.53	0.36	0.35	0.22	0.23	0.24	0.13	0.30	0.04
Al ₂ O ₃	1.07	0.94	0.93	0.89	1.05	1.07	0.80	0.89	0.90	1.03	0.48	0.44	0.59	0.54	0.60
FeO ^T	30.20	31.00	30.70	30.34	30.82	30.35	29.76	29.87	30.71	31.15	31.12	32.54	31.62	32.08	31.73
MnO										0.09				0.02	
MgO	0.08	0.06					0.10	0.02				0.11	0.05	0.14	0.08
CaO	0.07	0.05	0.08		0.07	0.05	0.08	0.06	0.06	0.22	0.08	0.17	0.16	0.12	0.15
Na ₂ O	14.66	14.65	14.66	14.84	14.79	14.42	14.72	14.42	14.48	14.11	14.51	14.22	14.20	14.24	14.54
K ₂ O	0.02	0.07				0.04	0.05		0.04	0.06	0.05				
Si	2.03	2.01	2.02	2.02	2.02	2.02	2.04	2.04	2.03	2.02	2.03	2.01	2.02	2.00	2.02
^{IV} Al	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
^{VI} Al	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03
Ti	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00
Fe ³⁺	0.87	0.90	0.88	0.88	0.89	0.88	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.94	0.92	0.93	0.91
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
Na	1.09	1.09	1.09	1.11	1.10	1.08	1.09	1.08	1.07	1.04	1.08	1.05	1.06	1.06	1.08
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
W _o	0.15	0.10	0.17	0.00	0.14	0.11	0.17	0.13	0.13	0.46	0.17	0.35	0.33	0.25	0.31
En	0.23	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.06	0.00	0.00	0.00	0.31	0.14	0.40	0.23
Fs	44.26	44.97	44.76	44.24	44.65	44.91	43.77	44.48	45.09	46.01	45.35	46.73	46.14	46.36	45.61
Ac	55.36	54.75	55.07	55.76	55.21	54.98	55.78	55.33	54.78	53.53	54.48	52.61	53.38	52.99	53.85

岩性 样号 点号	黑云母碱性长石正长岩					霓石钠闪碱性长石花岗岩									
	YX4-207					YX3-162									
	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	52.52	51.74	52.17	52.48	52.28	52.84	52.20	52.68	53.26	52.61	51.58	52.51	52.44	52.58	52.77
TiO ₂	0.19	0.03		0.09		0.54	0.61	0.64	0.25	0.53	1.29	0.68	0.40	0.72	0.56
Al ₂ O ₃	0.58	0.56	0.34	0.70	0.46	0.22	0.66	0.18	1.00	0.60	0.59	0.40	0.30	0.45	0.37
FeO ^T	31.29	32.39	31.93	31.79	31.70	31.26	30.66	31.02	30.79	31.12	31.59	31.26	31.61	30.85	31.13
MnO		0.06	0.00	0.21			0.23	0.13	0.07	0.10	0.12			0.06	0.02
MgO		0.11	0.10		0.07	0.06	0.04	0.13	0.07	0.01	0.02	0.01	0.01	0.08	0.00
CaO	0.06	0.24	0.15	0.11	0.16	0.01	0.04	0.14	0.08	0.04	0.07	0.01	0.02	0.02	0.09
Na ₂ O	14.40	13.94	14.30	13.99	14.40	14.40	14.42	14.64	13.96	14.35	14.51	14.38	14.61	14.52	14.43
K ₂ O			0.05			0.00		0.08	0.05	0.00					0.03
Si	2.02	2.00	2.02	2.02	2.02	2.03	2.02	2.02	2.03	2.02	1.98	2.02	2.02	2.02	2.03
^{IV} Al	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
^{VI} Al	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01	0.03	0.01	0.04	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02
Ti	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.04	0.02	0.01	0.02	0.02
Fe ³⁺	0.91	0.94	0.93	0.92	0.92	0.90	0.89	0.90	0.88	0.90	0.91	0.90	0.92	0.89	0.90
Mn	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	1.08	1.05	1.07	1.04	1.08	1.07	1.08	1.09	1.03	1.07	1.08	1.07	1.09	1.08	1.07
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
W _o	0.12	0.50	0.31	0.23	0.33	0.02	0.08	0.29	0.17	0.08	0.14	0.02	0.04	0.04	0.19
En	0.00	0.32	0.29	0.00	0.20	0.17	0.12	0.37	0.21	0.03	0.06	0.03	0.03	0.23	0.00
Fs	45.69	47.09	46.15	46.94	45.84	45.64	45.33	44.95	46.01	45.74	45.81	45.74	45.61	45.13	45.51
Ac	54.18	52.10	53.25	52.83	53.63	54.17	54.47	54.40	53.61	54.15	53.99	54.21	54.32	54.60	54.31

注:以 6 个氧原子和 4 个阳离子为基准,据路远发(2004) Geokit 软件计算。

表 5 黑云母的化学成分
Table 5 Chemical composition of biotite

$\omega_B/\%$

岩性	霓石钠闪石英碱性长石正长岩															
	YX1-054					YX1-057										
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	35.68	35.73	36.06	35.78	35.79	35.26	35.12	35.97	36.04	35.62	35.98	35.73	35.55	35.54	35.44	35.83
TiO ₂	2.09	2.05	1.93	2.01	2.43	1.62	1.46	1.83	2.30	2.29	2.40	2.52	1.83	2.18	1.55	1.91
Al ₂ O ₃	9.60	10.15	10.86	10.12	9.97	9.71	10.04	9.98	10.22	10.00	10.18	10.58	9.83	9.75	9.87	10.11
FeO	36.99	36.34	37.15	37.41	36.15	38.53	38.15	36.97	36.39	36.76	36.85	35.80	37.41	36.53	37.49	36.63
MnO	0.54	0.42	0.05	0.52	0.25	0.16	0.46	0.46	0.32	0.11	0.39	0.41	0.44	0.74	0.38	0.62
MgO	0.22	0.17	0.07	0.33	0.21	0.27	0.26	0.37	0.21	0.32	0.26	0.48	0.33	0.29	0.32	0.21
CaO	0.13	0.18	0.13		0.07	0.00		0.02	0.18	0.06	0.07	0.10	0.10	0.14	0.28	0.11
Na ₂ O	0.53	0.53	0.40	0.20	0.31		0.28		0.21	0.19	0.21	0.22	0.20	0.31	0.29	0.23
K ₂ O	8.84	8.86	9.12	8.98	8.95	9.04	9.15	8.62	8.87	9.27	8.92	9.19	8.30	8.67	8.57	8.83
Σ	94.62	94.43	95.77	95.35	94.13	94.59	94.92	94.22	94.74	94.62	95.26	95.03	93.99	94.15	94.19	94.48
Si	3.03	3.03	3.01	3.01	3.04	3.01	3.00	3.05	3.03	3.02	3.02	3.00	3.03	3.03	3.03	3.04
^{IV} Al	0.96	0.97	0.99	0.99	0.96	0.98	1.00	0.95	0.97	0.98	0.98	1.00	0.97	0.97	0.97	0.96
^{VI} Al	0.00	0.04	0.08	0.02	0.03	0.00	0.00	0.05	0.05	0.02	0.03	0.04	0.02	0.00	0.02	0.04
Ti	0.13	0.13	0.12	0.13	0.16	0.10	0.09	0.12	0.15	0.15	0.15	0.16	0.12	0.14	0.10	0.12
Fe ³⁺	0.12	0.14	0.15	0.14	0.18	0.12	0.07	0.20	0.19	0.15	0.18	0.17	0.18	0.16	0.13	0.17
Fe ²⁺	2.51	2.43	2.45	2.49	2.39	2.64	2.65	2.42	2.37	2.46	2.41	2.34	2.49	2.44	2.55	2.43
Mn	0.04	0.03	0.00	0.04	0.02	0.01	0.03	0.03	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.05	0.03	0.04
Mg	0.03	0.02	0.01	0.04	0.03	0.03	0.03	0.05	0.03	0.04	0.03	0.06	0.04	0.04	0.04	0.03
Ca	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01
Na	0.09	0.09	0.06	0.03	0.05	0.00	0.05	0.00	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.05	0.05	0.04
K	0.96	0.96	0.97	0.96	0.97	0.99	1.00	0.93	0.95	1.00	0.96	0.98	0.90	0.94	0.93	0.95
Σ	7.88	7.86	7.85	7.86	7.82	7.88	7.93	7.80	7.81	7.85	7.82	7.83	7.82	7.84	7.87	7.83
岩性	黑云母碱性长石正长岩															
	YX1-010				YX1-004											
	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SiO ₂	36.01	35.62	36.09	35.89	34.18	34.10	34.14	35.62	34.05	34.59	33.71	34.53	34.64	35.25		
TiO ₂	2.42	2.66	2.64	2.14	2.42	2.07	1.94	1.94	1.59	2.68	2.90	2.09	2.55	2.52		
Al ₂ O ₃	10.18	9.89	9.45	9.80	15.19	14.75	15.02	15.29	14.33	14.59	14.29	14.91	14.65	15.54		
FeO	36.26	36.52	36.63	37.14	33.43	33.84	33.28	32.31	34.88	33.56	33.14	33.30	34.07	31.46		
MnO	0.02	0.18	0.15	0.23	0.19	0.34	0.44	0.02	0.12	0.10			0.01	0.04		
MgO	0.39	0.09	0.46	0.44	0.31	0.20	0.33	0.24	0.25	0.17	0.51	0.17	0.26	0.22		
CaO	0.14		0.13	0.05	0.04	0.23	0.28	0.21	0.22		0.32		0.09			
Na ₂ O	0.09	0.02	0.15			0.10	0.22	0.27				0.14	0.16	0.03		
K ₂ O	8.83	9.24	8.85	9.11	8.71	8.62	8.79	8.73	8.87	9.34	9.45	8.89	8.70	9.03		
Σ	94.34	94.22	94.55	94.80	94.47	94.25	94.44	94.63	94.31	95.03	94.32	94.03	95.13	94.09		
Si	3.04	3.03	3.05	3.03	2.83	2.84	2.83	2.91	2.85	2.85	2.81	2.87	2.85	2.89		
^{IV} Al	0.96	0.97	0.94	0.97	1.17	1.16	1.17	1.09	1.15	1.15	1.19	1.13	1.15	1.11		
^{VI} Al	0.05	0.02	0.00	0.01	0.31	0.29	0.30	0.38	0.27	0.27	0.22	0.33	0.27	0.39		
Ti	0.15	0.17	0.17	0.14	0.15	0.13	0.12	0.12	0.10	0.17	0.18	0.13	0.16	0.16		
Fe ³⁺	0.21	0.19	0.20	0.17	0.26	0.23	0.21	0.29	0.18	0.24	0.19	0.25	0.25	0.32		
Fe ²⁺	2.34	2.41	2.39	2.46	2.05	2.13	2.10	1.92	2.26	2.08	2.12	2.07	2.10	1.84		
Mn	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
Mg	0.05	0.01	0.06	0.06	0.04	0.02	0.04	0.03	0.03	0.02	0.06	0.02	0.03	0.03		
Ca	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00		
Na	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00		
K	0.95	1.00	0.95	0.98	0.92	0.92	0.93	0.91	0.95	0.98	1.01	0.94	0.91	0.94		
Σ	7.79	7.81	7.80	7.83	7.74	7.77	7.79	7.71	7.82	7.76	7.81	7.75	7.75	7.68		

注：据路远发(2004) Geokit 软件计算。

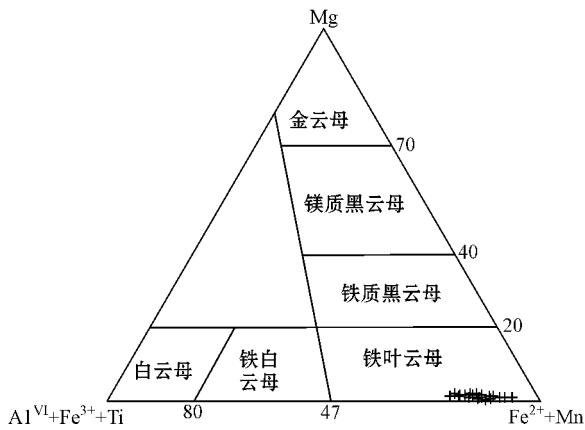


图 4 黑云母成分分类图(底图据张东阳等,2009)

Fig. 4 Classification diagram of biotite (after Zhang Dongyang *et al.*, 2009)

表 6 石英的化学成分

$w_B/\%$

Table 6 Chemical compositions of quartz

样号	点号	SiO ₂	FeO ^T	MnO	MgO	CaO	Σ
YX4-207	1	99.48	0.05	0.14	0.03		99.70
	2	99.02			0.14	0.02	99.18
	3	99.63	0.04	0.13			99.80
YX3-162	1	99.53					99.53
	2	99.50		0.09			99.59
	3	98.98		0.12			99.10
YX1-054	1	99.44	0.20	0.00	0.03		99.67
	2	99.09		0.00	0.06	0.00	99.15
YX2-143S	1	98.90	0.27	0.02	0.11		99.30
	2	99.19	0.38		0.19		99.76

YX4-207 (黑云母碱性长石正长岩); YX3-162 (霓石钠闪碱性长石花岗岩); YX1-054, YX2-143S (霓石钠闪石英碱性长石正长岩)。

锆的含量(Zr_{melt}),可以根据下述公式来计算锆饱和温度: $T_{Zr} = 12\ 900 / [2.95 + 0.85 M + \ln(496\ 000 / Zr_{melt})]$ 。岩浆的主要成分及锆的含量原始数据另文发表,笔者估算了波孜果尔 A 型花岗岩的初始岩浆温度分别为:霓石钠闪碱性长石花岗岩 728~855℃,平均为 771℃;黑云母碱性长石正长岩 860~939℃,平均为 914℃;霓石钠闪石英碱性长石正长岩 750~939℃,平均为 832℃。与前人(胡建等,2006;汪洋,2008,2009;王涛等,2009)估算的碱性花岗岩的岩浆结晶温度或者岩体的成岩温度 $t_{Zr} = 830 \sim 950^\circ\text{C}$ 一致。

5.1.2 稀土元素在岩浆中的饱和浓度温度计

独居石在长英质岩石中对微量元素(Pb、U、Th)和稀土元素(REE)具有一定的控制作用,Rapp 等(1986)通过实验证明,独居石的溶解度与温度呈强烈的正相关。Montel(1993)通过实验得出了 LREE 在

岩浆中饱和浓度温度计,适用于贫 Ca、Fe、Mg 的花岗岩。此温度计估算出的是独居石与熔体最终平衡时的温度。微量元素原始数据另文发表,笔者利用上述温度计估算了波孜果尔 A 型花岗岩类的大致岩浆温度:霓石钠闪碱性长石花岗岩 758~876℃,平均为 828℃;黑云母碱性长石正长岩 808~859℃,平均为 833℃;霓石钠闪石英碱性长石正长岩 802~872℃,平均为 832℃。

利用上述温度计估算的岩浆平均温度 $t_{REE} = 832^\circ\text{C}$, $t_{Zr} = 839^\circ\text{C}$ 。可见,波孜果尔 A 型花岗岩类与 A 型花岗岩中过碱性亚类的锆石饱和温度极为接近(平均值为 883℃,刘昌实等,2003a,2003b),而显著高于典型的 I 型和 S 型花岗岩(平均值分别为 781℃和 764℃,King *et al.*,1997),较之铝质 A 型花岗岩(平均值为 800℃,刘昌实等,2003a,2003b)也偏高,这套岩石属于 A 型花岗岩。

5.2 构造环境

Loiselle 和 Wones(1979)把 A 型花岗岩的构造背景定义为“非造山”的张性环境。Pitcher(1983)认为 A 型花岗岩类产于非造山的板内环境。Whalen 等(1987)指出 A 型花岗岩的形成与拉张的构造背景有关。Maniar 和 Piccoli(1989)认为不同程度的拉张背景可以产生不同类型的 A 型花岗岩。洪大卫等(1995)认为拉张规模和深度的差异是产生不同类型的 A 型花岗岩的重要原因。Eby(1990,1992)认为 A 型花岗岩不仅限于板内裂谷的非造山环境,还包括了造山晚期、造山后期等多种与俯冲有关的构造环境。可见,A 型花岗岩产于伸展的构造背景得到了普遍认同。Abdel-Rahman(1994)发现可以用黑云母的 $\text{FeO}^T - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ 组成来有效区分花岗岩类形成的构造环境。他认为非造山碱性花岗岩系产于高温、无水的环境,不利于早期磁铁矿及钛铁氧化物晶出,故晚期晶出的黑云母具有富 Fe 特征;相反,造山带的钙碱性岩系则与俯冲有关,俯冲过程中产生富水流体特别有利于磁铁矿的早期晶出,致使晚期晶出的黑云母具有富 Mg、相对富 Al 和贫 Ti 的特征。波孜果尔花岗岩类中的黑云母均落在非造山碱性花岗岩系(A)区(图 5),表明本区 A 型花岗岩类产于高温、无水的环境且成因与俯冲无关。根据全岩分析和地球化学数据(另文发表),在 Batchelor 和 Bowden(1985)的 $R_1 - R_2$ 图解(图略)上,波孜果尔 A 型花岗岩类落在非造山区。在 Eby(1990,1992)的 Y - Nb - Ce、Y - Nb - Ga $\times 3$ 三角判别图上,落在非造山的板

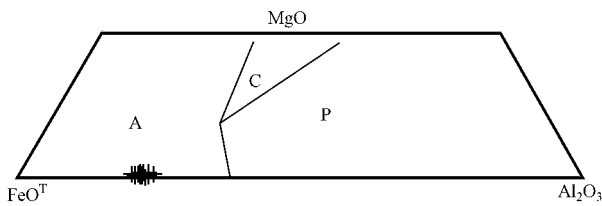


图 5 黑云母 $\text{FeO}^{\text{T}} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ 图(据 Abdel-Rahman, 1994)

Fig. 5 $\text{FeO}^{\text{T}} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ diagram of biotite (after Abdel-Rahman, 1994)

A—非造山带碱性花岗岩中的黑云母所在区；P—过铝性花岗岩(包括 S 型)中黑云母所在区；C—造山带钙碱性花岗岩中黑云母所在区

A—area of biotite in alkaligranite of the anorogenic belt; P—area of biotite in peraluminous granites (including S-type); C—area of biotite in calc-alkaline granite of the orogenic belt

内构造环境区。

Wones 和 Eugster(1965)通过研究与磁铁矿和钾长石共生的黑云母 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 原子百分数来估计岩浆的氧逸度。在 $\text{Fe}^{3+} - \text{Fe}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ 图解(图 6)上,样品落在 Ni-NiO (NNO)线之下,表明本区碱性花岗岩类的氧逸度低于 NNO 体系,形成于较低的 f_{O_2} 条件,与黑云母的低钛和低^{VI}Al 所指示的低 f_{O_2} 介质环境一致。

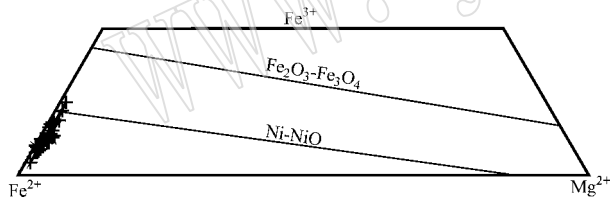


图 6 黑云母 $\text{Fe}^{3+} - \text{Fe}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ 图解(据 Wones and Eugster, 1965)

Fig. 6 $\text{Fe}^{3+} - \text{Fe}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ diagram of biotite (after Wones and Eugster, 1965)

6 结论

(1) 波孜果尔 A 型花岗岩类包括霓石钠闪石英碱性长石正长岩、霓石钠闪碱性长石花岗岩、黑云母碱性长石正长岩 3 种岩石类型。主要造岩矿物为石英、钠长石、钾长石、霓石、钠铁闪石和铁叶云母,副矿物为锆石、烧绿石、钽石、萤石、独居石、氟碳铈镧矿、磷钇矿等。

(2) 霓石钠闪碱性长石花岗岩的平均 $t_{\text{Zr}} = 771^\circ\text{C}$, 平均 $t_{\text{REE}} = 828^\circ\text{C}$; 黑云母碱性长石正长岩的平均 $t_{\text{Zr}} = 914^\circ\text{C}$, 平均 $t_{\text{REE}} = 833^\circ\text{C}$; 霓石钠闪石英碱

性长石正长岩的平均 $t_{\text{Zr}} = 832^\circ\text{C}$, 平均 $t_{\text{REE}} = 833^\circ\text{C}$ 。波孜果尔 A 型花岗岩类的岩浆平均温度 $832 \sim 839^\circ\text{C}$ 。

(3) 波孜果尔 A 型花岗岩类黑云母矿物学研究表明,该岩体形成于非造山的板内构造环境,岩石形成于高温无水且低氧逸度的介质环境。

致谢：中国地质大学(北京)地学实验中心的苏犁老师、方勤方老师在论文撰写过程中给予了大量的指导和帮助;在成文过程中,与中国地质科学院地质研究所的高利娥博士进行了有益的探讨。匿名审稿人和编辑提出了宝贵的修改意见。在此一并表示衷心的感谢!

References

- Abdel-Rahman A M. 1994. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline and peraluminous magmas[J]. *J. Petrol.*, 35: 525~541.
- Batchelor R A and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multication parameters[J]. *Chem. Geol.*, 48: 43~55.
- Chang Lihua, Chen Manyun, Jin Wei, *et al.* 2006. The Identification Brochure of Transparent Mineral Thin Sections[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. *Lithos*, 26: 115~134.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20: 641~644.
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Han Baofu, *et al.* 1995. The tectonic environment classification and identifying features of the alkali granite [J]. *Science China(Series B)*, 25(4): 418~426(in Chinese).
- Holtz F, Johannes W and Tamic N. 2001. Maximum and minimum water contents of granitic melts generated in the crust: a reevaluation and implications[J]. *J. Lithos*, 56(1): 1~14.
- Hu Jian, Qiu Jiansheng, Wang Rucheng, *et al.* 2006. Geochemistry of gneissic alkaline granites in Donghai County, Jiangsu Province, and its tectonic significances[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(12): 1877~1891(in Chinese with English abstract).
- Jia Xiaohui, Wang Qiang and Tang Gongjian. 2009. A-type granites: Research progress and implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(3): 465~480(in Chinese with English abstract).
- King P L, White A J R and Chappell B W. 1997. Characterization and origin of aluminous A type granites of the Lachlan Fold Belt, south-eastern Australia[J]. *J. Petrol.*, 36: 371~391.
- Klimm K, Holtz F, Johannes W, *et al.* 2003. Fractionation of metaluminous A-type granites: An experimental study of the Wangrah Suite, Lachlan Fold Belt, Australia [J]. *Precam. Brian. Res.*, 124: 327~341.
- Leake B E, Wooley A R, Arps C E S, *et al.* 1997. Nomenclature of

- amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names[J]. *Canadian Mineralogist*, 35: 219~246.
- Li Xiangdong, Xiao Wenjiao and Zhou Zongliang. 2004. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age determination on the Late Devonian tectonic event along the southern margin of the South Tianshan Mountains and its significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 691~696(in Chinese with English abstract).
- Liu Changshi, Chen Xiaoming, Chen Peirong, *et al.* 2003a. Subdivision, discrimination criteria and genesis for A-type rock suites[J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 573~591(in Chinese with English abstract).
- Liu Changshi, Chen Xiaoming, Wang Rucheng, *et al.* 2003b. Origin of Nankunshan aluminous A-type granite, Longkou County, Guangdong Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(1): 1~10(in Chinese with English abstract).
- Loiselle M C and Wones D R. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites [A]. *Geological Society of America Abstracts with Programs* 11[C]. 468.
- Lu Yuanfa. 2004. GeoKit-A geochemical toolkit for Microsoft Excel[J]. *Geochimica*, 33(5): 459~464(in Chinese with English abstract).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of American Bulletin*, 101: 635~645.
- Miller C F, McDowell S M and Mapes R W. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance[J]. *Geology*, 31: 529~532.
- Montel J M. 1993. A model for monazite/melt equilibrium and the application to the generation of granitic magmas[J]. *Chemical Geology*, 110: 127~146.
- Pitcher W S. 1983. Granite Type and Tectonic Environment[A]. *Hsuk. Mountain Building Processes*[C]. London: Academic Press.
- Rapp R P and Watson E B. 1986. Monazite solubility and dissolution kinetics: Implication for the Th and light rare-earth chemistry of felsic magmas [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 94: 304~316.
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua and Xiong Xiaolin. 2000. The Ascertainment of Late-Yanshanian A-type Granite in Tongbai-Dabie Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(4): 297~306(in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Liu Shen, Hu Ruizhong, *et al.* 2009. Elemental Geochemistry and Petrogenesis of A-type Granites in the Sulu Orogen[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 39(4): 676~688(in Chinese with English abstract).
- Wang Yang. 2008. Petrogenesis of the Jurassic aluminous A-type granites in the Nanling area, south China and its constraint on paleogeotherm[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(3): 365~381(in Chinese with English abstract).
- Wang Yang. 2009. Geochemistry of the Baicha A-type granite in Beijing Municipality: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 13~24(in Chinese with English abstract).
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64: 295~304.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions Mineralogy Petrology*, 95: 407~419.
- Wones D R and Eugster H P. 1965. Stability of biotite experiment, theory, and application[J]. *Am. Mineral.*, 50: 1 228~1 235.
- Zhang Dongyang, Zhang Zhaochong, Ai Yu, *et al.* 2009. Mineralogy of ore-bearing porphyries in Lailisigao'er area of the West Tianshan Mountain and its implications for petrogenesis and mineralization[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(1): 3~16(in Chinese with English abstract).
- Zou Tianren and Li Qingchang. 2006. Rare and Rare Earth Metallic Deposits in Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Zou Tianren, Lu Fengxiang, Xu Yu, *et al.* 2004. The Study on the Mineral-Forming Conditions of the Alkaline Rock Belts and Rare Earth, Gemstone and Diamond in the North Margin of Tarim[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press(in Chinese).

附中文参考文献

- 常丽华, 陈曼云, 金 巍, 等. 2006. 透明矿物薄片鉴定手册[M]. 北京: 地质出版社.
- 洪大卫, 王式洗, 韩宝福, 等. 1995. 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)*, 25(4): 418~426.
- 胡 建, 邱检生, 王汝成, 等. 2006. 江苏东海片麻状碱性花岗岩的地球化学及其构造指示意义[J]. *地质学报*, 80(12): 1 877~1 891.
- 贾小辉, 王 强, 唐功建. 2009. A型花岗岩的研究进展及意义[J]. *大地构造与成矿学*, 33(3): 465~480.
- 李向东, 肖文交, 周宗良. 2004. 南天山南缘晚泥盆世构造事件的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年证据及其意义[J]. *岩石学报*, 20(3): 691~696.
- 刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 等. 2003a. A型岩套的分类、判别标志和成因[J]. *高校地质学报*, 9(4): 573~591.
- 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 等. 2003b. 广东龙口南昆山铝质A型花岗岩的成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 22(1): 1~10.
- 路远发. 2004. GeoKit: 一个用VBA构建的地球化学工具软件包[J]. *地球化学*, 33(5): 459~464.
- 王 强, 赵振华, 熊小林. 2000. 桐柏-大别造山带燕山晚期A型花岗岩的厘定[J]. *岩石矿物学杂志*, 19(4): 297~306.
- 王 涛, 刘 攀, 胡瑞忠, 等. 2009. 苏鲁造山带A型花岗岩的元素地球化学及其成因[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 39(4): 676~688.
- 汪 洋. 2008. 再论南岭侏罗纪“铝质”A型花岗岩的成因及其对古低温线的制约[J]. *大地构造与成矿学*, 32(3): 365~381.
- 汪 洋. 2009. 北京白查A型花岗岩的地球化学特征及其成因与构造指示意义[J]. *岩石学报*, 25(1): 13~24.
- 张东阳, 张招崇, 艾 羽, 等. 2009. 西天山莱历斯高尔一带铜(钼)矿成矿斑岩体矿物学特征及其成岩成矿意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 28(1): 3~16.
- 邹天人, 李庆昌. 2006. 中国新疆稀有及稀土金属矿床[M]. 北京: 地质出版社.
- 邹天人, 路凤香, 徐 钰, 等. 2004. 塔里木盆地北缘碱性岩带及稀土、宝玉石、金刚石成矿条件研究[M]. 北京: 冶金工业出版社.