

柴北缘塔塔楞环斑花岗岩的 矿物学特征及岩石学意义

胡能高¹, 王 锐², 王晓霞³, 孙延贵⁴, 林 伟¹, 申文环⁵

(1 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2 西北有色地质勘查局 712 总队, 陕西 咸阳 712000;

3 中国地质调查局 发展研究中心, 北京 100037; 4 青海省地质调查院, 青海 西宁 810012;

5 山东省化工地质勘察院, 山东 济南 250013)

摘要: 通过对塔塔楞环斑花岗岩主要矿物结构及成分研究表明, 岩体结晶经历了下列几个阶段: 最早结晶的矿物为斜长石、黑云母和石英, 随后为钾长石球斑的主要结晶期, 紧接着有球斑的环边生长和中粗粒基质形成, 最后结晶产物为分布在中粗粒基质间隙的细粒基质。黑云母都是富铁的, 从早期到晚期富铁程度增加, $w(\text{TFeO})/w(\text{TFeO}+\text{MgO})$ 从 0.80 增加到 0.96。钾长石广泛发育出溶钠长石条纹, 推算出的球斑钾长石、中粗粒基质和细粒基质钾长石的平均成分分别为 $\text{Or}_{69.61}\text{Ab}_{29.59}\text{An}_{0.80}$ 、 $\text{Or}_{71.50}\text{Ab}_{27.94}\text{An}_{0.56}$ 、 $\text{Or}_{72.63}\text{Ab}_{26.47}\text{An}_{0.90}$ 。球斑内斜长石的 An 为 25.98~29.41, 中粗粒基质的 An 为 23.85~27.48, 而细粒中的 An 为 11.94, 主要矿物特征与经典环斑花岗岩一致, 而矿物成分的变异显示岩体形成过程中发生了有效的结晶分异。

关键词: 柴北缘构造带; 塔塔楞岩体; 环斑花岗岩; A 型花岗岩; 黑云母; 钾长石

中图分类号: P588.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2008)04-0337-09

Mineralogical Characteristics and Petrological Significance of the Tataleng Rapakivi Granite in the Northern Margin of Qaidam Basin

HU Neng-gao¹, WANG Rui², WANG Xiao-xia³, SUN Yan-gui⁴, LIN Wei¹, SHEN Wen-huan⁵

(1. School of Earth Sciences and Resource, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Northwest Mining and Geological Exploration Bureau for Nonferrous Metals, 712 Team, Xianyang 712000, Shaanxi, China; 3. Development and Research Center of China Geologic Survey Bureau, Beijing 100073, China;

4. The Geologic Survey Department of Qinghai Province, Xining 810012, Qinghai, China; 5. The Chemical Geological Survey Academy of Shandong Province, Jinan 250013, Shandong, China)

Abstract: Petrographic observations and analyses for dominant minerals indicate that the Tataleng rapakivi granite experienced several stages of crystallization. The earliest stage is the crystallization of plagioclase biotite and quartz. The second stage is the main crystallization stage of the rounded K-feldspar phenocrysts. At the third stage, the crystallization of medium-to coarse-grained matrix minerals is accompanied by the growth of zoned rim of rounded phenocryst. The fine-grained matrix minerals, which distributed in the interstices of the coarser matrix minerals, are the results of the last stage. Biotite at different stages are always rich in iron, and the $w(\text{TFeO})/w(\text{TFeO}+\text{MgO})$ ratios increase from 0.80 to 0.96 from the earliest stage to the last stage. Exsolved albite lamellas widely distributed in K-feldspars, and the calculated average compositions for rounded phenocrysts, medium-to coarse-grained and fine-grained K-feldspars are $\text{Or}_{69.61}\text{Ab}_{29.59}\text{An}_{0.80}$, $\text{Or}_{71.50}\text{Ab}_{27.94}\text{An}_{0.56}$

收稿日期: 2008-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40372043)

作者简介: 胡能高(1949-), 男, 浙江东阳人, 教授, 从事岩石学和地球化学教学与研究。E-mail: nenggaoh@chd.edu.cn

and $Or_{72.63} Ab_{26.47} An_{0.90}$, respectively. The An values of plagioclase included in the rounded phenocrysts, medium- to coarse-grained matrix and fine-grained matrix are 25.98 to 29.41, 23.85 to 27.48 and 11.94, respectively. The characteristics of dominant minerals are identical with classic rapakivi granite, while the variations in mineral compositions testified an efficient process of crystallization differentiation.

Key words: northern margin of Qaidam basin; Tataleng intrusions; rapakivi granite; A-type granite; biotite; K-feldspar

0 引言

塔塔楞岩体位于青海省大柴旦镇北, 是一个加里东期的环斑花岗岩体, 前人已对其年代学^[1]、岩体地质、岩相学、岩石地球化学做了初步研究, 并探讨了构造环境^[2], 相关研究表明, 环斑花岗岩不仅可以产生在不同的地质时期, 也显示了地质学、岩相学、岩石地球化学上的多样性和构造背景上的复杂性。笔者旨在介绍塔塔楞环斑花岗岩体的矿物学特征, 并讨论其地质学及岩石学意义, 希望能揭示不同环斑花岗岩在矿物特征上的共性和差异。

1 地质背景和岩相学特征

塔塔楞岩体是一个近于平行四边形的岩基, 出露面积近 2 000 km², 侵位于柴北缘构造带北侧的古生代—早中生代裂隙内, 北边与祁连地块相邻, 西南侧以一条巨大的韧性剪切带与晚古生代高压—超高压变质带相接。该岩体侵入于中晚奥陶系地层中, 被侵入的地层均发育较宽的热接触变质带。岩体中部有大面积中晚奥陶系顶盖残留, 岩体之上最老的盖层为三叠系砂砾岩^[2]。

塔塔楞岩体是一个大的复式岩体, 按侵入关系和岩相学特征可分为 3 期: 早期以中细粒—细粒黑云母二长花岗岩为主; 中期侵入体由中粗粒含黑云母正长花岗岩和似斑状含黑云母正长花岗岩以及粗粒黑云母二长花岗岩组成; 晚期侵入体具有环斑结构, 属环斑花岗岩, 呈等轴状, 侵入于早期和中期岩体内。岩体中分布花岗闪长质及石英闪长质包体, 尤其在早期侵入体中较发育。包体大小多数在数十厘米, 与主岩界限有清楚的, 也有过渡的。包体的矿物组成及结构表明多为析离体^[2]。

塔塔楞岩体多由石英、钾长石、斜长石和黑云母组成。在 QAP 分类图上, 3 期侵入体的投影点构成一个连续的区域, 多位于正长花岗岩区和二长花岗岩区(图 1)。黑云母的体积分数在早期侵入体中最高, 平均为 8%, 第 2 期中最低, 平均为 4%, 晚期中居中, 平均为 6%。石英的体积分数中期的最

高, 平均为 30%; 早期和晚期的相近, 平均约为 24%。斜长石的体积分数以中期最低, 为 20.56%, 晚期环斑花岗岩平均为 24%, 也较低; 早期的最高, 为 36%。钾长石的体积分数从早到晚有递增趋势, 平均为 31%、45%、50%。这 3 期侵入体的结构也存在差异, 矿物粒径从早到晚有变粗之势, 早期侵入体无斑晶, 中期侵入体出现斑晶, 量较少, 多为板状钾长石, 晚期侵入体出现球状大钾长石斑晶, 显示环斑结构特点^[2]。副矿物中的磷灰石、锆石、钛铁矿较多见, 其中钛铁矿和锆石在早期岩体中较丰富, 中期岩体中电气石较多见。锆石和磷灰石都有针状和柱状两种形态, 部分锆石显示明显的环带结构^[2]。

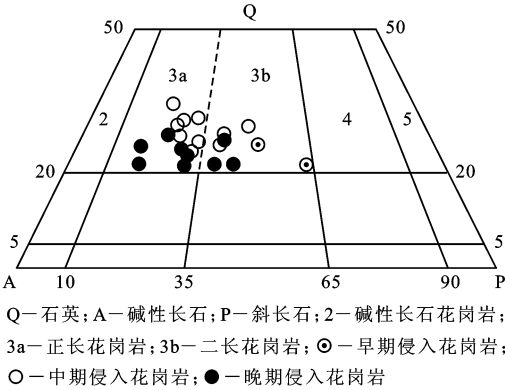
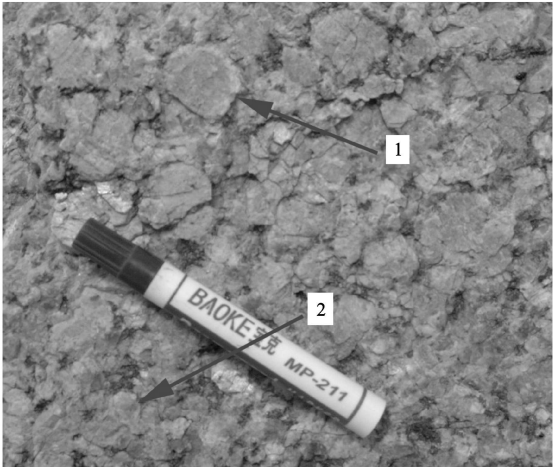


图 1 QAP 图解

Fig. 1 QAP Diagram

具环斑结构的花岗岩仅发育于晚期相中。斑晶为卵球状钾长石, 直径为 1.5 ~ 4.0 cm, 多数在 2.5 cm 左右。岩石中钾长石球斑的体积分数为 20% ~ 58%, 平均约 35%。部分钾长石球斑有灰白色更长石环边, 有连续完整环绕一圈的, 也有不完整的, 但多数球斑不带更长石环边(图 2), 具有 Pyterlitic 型环斑结构的特征。镜下观察可见, 钾长石球斑多数为单晶, 但部分为多晶集合体, 他们均具卡式双晶, 发育出溶钠长石条纹, 球斑内多包裹有黑云母、斜长石、石英等矿物。基质有中粗粒和细粒两个粒径矿物, 以中粗粒的为主, 中粗粒结构者主要由石英、斜长石、钾长石和黑云母组成(图 3), 石英多呈圆状和椭圆状(图 2、3), 显示出被熔蚀的结构特

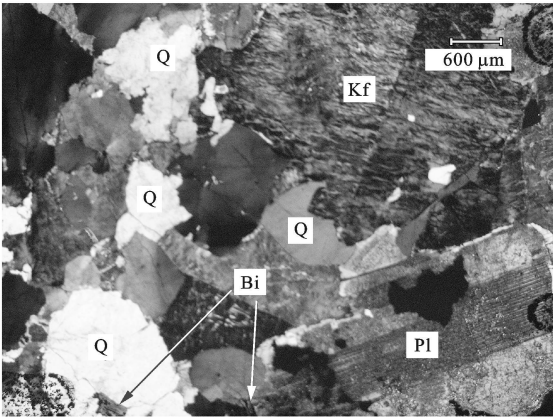
征。细粒结构者, 多在中粗粒结构基质矿物间呈囊状分布, 有细粒钠质长石、钾长石和石英组成, 部分呈显微文象结构(图 4), 显示共结特征。



箭头 1: 球斑带斜长石环边; 箭头 2: 圆粒状石英

图 2 环斑花岗岩露头照片

Fig. 2 Photo of the Outcrop of Rapakivi Granite



Bi—黑云母; Q—石英; Pl—斜长石; Kf—钾长石

图 3 中粗粒基质镜下照片

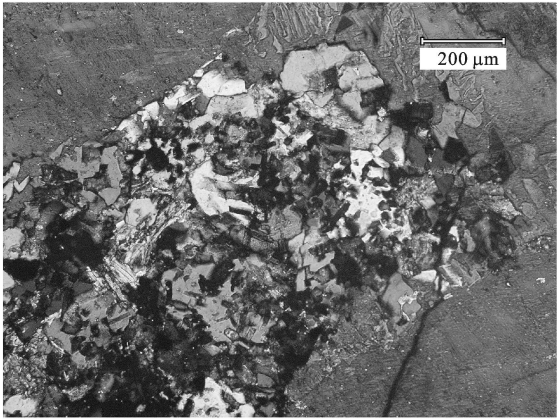
Fig. 3 Microscope Photo of Medium- to Coarse-grained Matrix

2 矿物学特征

环斑花岗岩主要由钾长石、斜长石、石英和黑云母组成。

2.1 钾长石

钾长石是环斑花岗岩中含量最高的矿物, 体积分数为 40% ~ 69%, 平均为 50%, 以 3 种产状产出。钾长石斑晶, 产于中粗粒基质和细粒基质中, 多为卵球状, 笔者将具有球状形态的钾长石斑晶称作球斑。球斑直径多在 2.5 cm 左右, 部分球斑周边有宽约数毫米的更长石镶边(图 2)。球斑与斜长

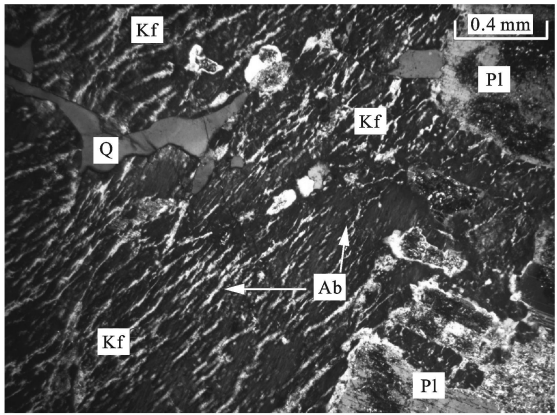


摄自薄片 T110

图 4 细粒基质镜下照片

Fig. 4 Microscope Photo of Fine-grained Matrix

石环边的边界多不平滑, 呈齿状, 且在边界的球斑内侧, 常见长方形的与环边斜长石一致消光的多个小长石晶体(图 5)。钾长石球斑多为单个晶体, 具卡式双晶, 广泛发育钠长石条纹, 出溶条纹多定向排列, 但条纹大小相差甚远, 较大条纹在(0.01 ~ 0.03) mm × (0.60 ~ 1.20) mm, 较小的条纹仅长 0.05 mm。出溶体的体积分数为 25% 左右(图 5)。部分钾长石球斑由多个钾长石集合体组成, 称多晶球斑。多晶球斑内的钾长石均具卡式双晶, 出溶的钠长石条纹可跨钾长石晶体边界(图 6)。钾长石球斑内多分布有小粒黑云母、斜长石和石英等晶体。在中粗粒基质中的钾长石多呈半自形—他形晶, 也具有卡式双晶, 并广泛发育钠长石条纹(图 3)。细粒基质中的钾长石与石英常呈显微文象状交生(图 4)。

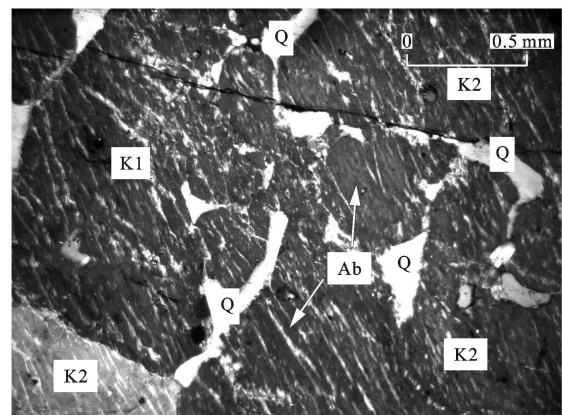


Q—石英; Pl—斜长石; Kf—钾长石;

Ab—出溶钠长石; 摄自薄片 T116

图 5 钾长石球斑一角

Fig. 5 Corner of the Spherical K-feldspar



K1、K2—钾长石晶体；Ab—出溶的钠长石条纹；
Q—文象状石英；摄自薄片 T116

图 6 多斑钾长石球斑一部分

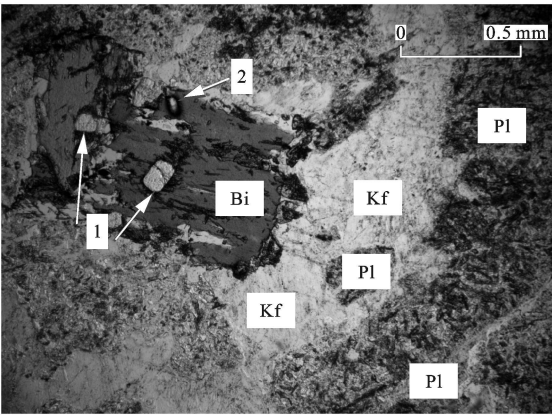
Fig. 6 Part of the Spherical K feldspar Megacryst

表 1 列出了不同产状钾长石的成分及相邻出溶钠长石条纹成分，编号 2、5、13、15、18 为钾长石球斑主晶成分点，而编号 3、6、12、16、17 为与他们相邻的出溶钠长石成分点。资料表明，这些钾长石和钠长石都是较纯的，5 个钾长石样品均未检出 $w(\text{CaO})$ ，而 $w(\text{K}_2\text{O})$ 都在 15% 以上， $w(\text{Na}_2\text{O})$ 也较低，最高的仅为 0.91%，表现在计算分子式上， O_r 为 91.39~94.62，平均为 92.69，Ab 为 5.38~8.61，平均为 7.31。相邻出溶钠长石的 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 11.43~12.46， $w(\text{K}_2\text{O})$ 和 $w(\text{CaO})$ 都低。编号为 8、11、20、22、30 的为中粗粒基质钾长石，而编号为 9、10、19、23、29 的分别为与他们相邻的出溶钠长石。中粗粒钾长石中的 O_r 为 92.58~96.52，平均为 94.77，Ab 为 3.28~7.32，平均为 5.48，仅 22 号点检出很低的 $w(\text{CaO})$ (0.07%)。25 和 28 号为细粒基质中的钾长石， O_r 分别为 97.10 和 96.30，相邻出溶钠长石 (26 和 29 号) 也是较纯的，Ab 分别为 92.84 和 99.19。由此可以看出，无论哪种产状的钾长石及相邻的出溶钠长石都是较纯的，相比之下，球斑钾长石及相邻的出溶钠长石互溶程度略高，而细粒基质最纯。

2.2 斜长石

在环斑花岗岩中斜长石的体积分数为 13%~29%，平均为 24%，分 4 种产状：第 1 种分布在球斑中，被球斑钾长石包裹，这种斜长石多具有自形晶，大小为 (0.05~0.12) mm×(0.2~0.5) mm (图 7)；第 2 种分布在球斑环边 (图 2、5)；第 3 种和第 4 种分别产于中粗粒基质 (图 3) 和细粒基质 (图

4) 中，与石英、钾长石共生。中粗粒基质中的斜长石以半自形为主，发育复合双晶，而细粒基质中的斜长石多发育聚片双晶，以粒状为主。各产状中的斜长石多为更长石，但成分有较大的变化范围。斜长石的蚀变发育程度也有差异，其中以包裹在球斑中的蚀变较强，细粒基质中最弱，主要蚀变为绢云母化、高岭土化和帘石化。



Bi—黑云母；Pl—斜长石；Kf—钾长石主晶 (球斑)；黑云母和斜长石都有蚀变，黑云母中有自形磷灰石 (箭头 1) 和锆石 (箭头 2)

图 7 球斑中自形的斜长石和黑云母

Fig. 7 Euhedral Plagioclase and Biotite in the Spherical K-feldspar Megacryst

不同产状的斜长石探针分析资料列于表 1 中，其中编号为 1、4、14 的是被包裹在球斑中的斜长石， A_n 分别为 29.41、25.98、27.87，属于较高号码的更长石。中粗粒基质中的斜长石为 7 号和 21 号， A_n 分别为 23.95 和 27.48，细粒基质中的斜长石为 24 号， A_n 为 11.94。

2.3 石英

环斑花岗岩中石英的体积分数为 20%~29%，平均为 24%。有 3 种产状：第 1 种为被包裹在球斑中的，有圆粒状和象形文字状两种晶形 (图 6)；第 2、3 种石英分别分布在中粗粒基质和细粒基质中，在中粗粒基质中的常有熔蚀圆化 (图 2、3) 现象，细粒基质中的石英有的与碱性长石呈显微文象状交生，有的呈他形粒状 (图 4)。

2.4 黑云母

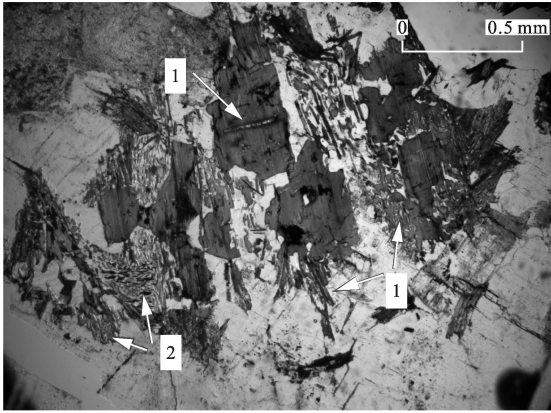
黑云母是塔塔楞环斑花岗岩中唯一的铁镁硅酸盐矿物，体积分数为 4%~9%，平均为 6%。以出现在中粗粒基质中的黑云母为主，其次为包裹在球斑内和细粒基质中的。球斑中的黑云母呈片状自形晶 ($d=0.2\sim0.5$ mm) (图 7)。基质中分布的呈半自形晶，部分中粗粒中的黑云母与石英呈似蠕

表 1 长石成分探针分析结果和计算的端元组分及二长石平衡温度

Tab. 1 Probe Analyses Results and Caculated Molecular Formula of Feldspar and the Temperature for Or/Ab/An <small>w_B/ %</small>													
编号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	T FeO	M nO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Σ	Or	Ab	An	温度/℃
1	61.45	0.00	24.20	0.00	0.00	6.33	8.28	0.27	100.53	1.37	69.22	29.41	796 ^①
2	65.34	0.15	18.13	0.23	0.00	0.00	0.91	15.33	100.09	91.81	8.19	0.00	
3	67.62	0.00	19.56	0.31	0.31	1.28	11.43	0.10	100.29	0.51	93.65	5.84	422 ^②
2-3 *										68.99	29.55	1.64	
4	61.98	0.00	23.27	0.00	0.18	5.54	8.69	0.09	99.75	0.52	73.50	25.98	769 ^①
5	64.74	0.22	18.08	0.00	0.00	0.00	0.77	15.80	99.61	93.06	6.94	0.00	
6	66.09		18.51	0.15		0.04	12.46	0.09	100.34	0.50	99.25	0.25	396 ^②
5-6 *										69.92	30.04	0.07	
7	63.31	0.00	22.85	0.00	0.00	5.19	9.12	0.14	100.61	0.77	75.38	23.85	747 ^①
8	66.31	0.19	17.44	0.25	0.00	0.00	0.80	15.51	100.50	92.68	7.32	0.00	
9	69.38	0.00	18.79	0.00	0.16	0.73	11.23	0.11	100.40	0.61	95.94	3.45	416 ^②
8-9 *										69.66	29.47	0.87	
10	66.99	0.00	20.28	0.18	0.00	1.07	11.34	0.70	100.56	3.75	91.50	4.75	369 ^①
11	66.68	0.00	17.77	0.00	0.00	0.00	0.53	15.86	100.84	95.20	4.80	0.00	
10-11 *										72.33	26.48	1.19	
12	68.65	0.00	18.22	0.00	0.00	0.24	11.80	0.03	98.94	0.16	98.80	1.04	370 ^②
13	65.32	0.15	17.33	0.28	0.00	0.00	0.58	15.72	99.37	94.62	5.38	0.00	
12-13 *										71.00	28.73	0.26	
14	61.61	0.00	23.49	0.13	0.00	6.24	8.84	0.11	100.42	0.58	71.55	27.87	797 ^①
15	66.48	0.17	17.92	0.00	0.00	0.00	0.97	15.48	101.02	91.39	8.61	0.00	
16	67.92	0.00	19.56	0.00	0.00	0.96	11.70	0.01	100.15	0.05	95.65	4.30	424 ^②
15-16 *										68.55	30.17	1.08	
17	68.04	0.03	18.74	0.00	0.00	0.40	11.83	0.12	99.37	0.64	95.57	1.79	408 ^①
18	65.89	0.24	17.71	0.00	0.08	0.00	0.80	15.22	99.93	92.55	7.45	0.00	
17-18 *										69.57	29.48	0.95	
19	69.03	0.00	18.20	0.18	0.00	0.30	12.72	0.12	100.55	0.60	98.20	1.20	364 ^②
20	65.61	0.00	17.64	0.00	0.00	0.00	0.52	15.24	99.01	95.00	5.00	0.00	
19-20 *										71.40	28.30	0.30	
21	60.99	0.00	24.06	0.19	0.00	6.06	8.48	0.38	100.16	2.10	70.22	27.68	769 ^①
22	66.79	0.03	17.53	0.00	0.00	0.07	0.58	15.96	99.96	94.43	5.29	0.28	
23	68.85	0.00	18.41	0.00	0.21	0.10	10.88	0.26	98.70	1.53	97.91	0.56	370 ^②
22-23 *										71.20	28.44	0.36	
24	65.43	0.00	21.71	0.14	0.00	2.69	10.92	0.10	100.35	0.50	87.56	11.94	630 ^①
25	66.34	0.00	17.35	0.00	0.00	0.00	0.32	15.80	99.81	97.10	2.90	0.00	
26	66.96	0.14	19.94	0.06	0.00	1.47	11.37	0.11	100.06	0.58	92.84	6.58	322 ^②
25-26 *										72.97	25.38	1.65	
27	69.33	0.00	18.88	0.00	0.00	0.06	11.31	0.03	99.61	0.27	99.19	0.54	336 ^②
28	65.65	0.00	17.47	0.00	0.00	0.00	0.39	15.94	99.45	96.30	3.70	0.00	
27-28 *										72.29	27.57	0.14	
29	68.73	0.00	18.59	0.00	0.00	0.36	11.67	0.20	99.62	1.01	97.47	1.52	333 ^②
30	66.48	0.09	17.48	0.00	0.00	0.00	0.38	15.68	99.70	96.52	3.48	0.00	
29-30 *										72.64	26.97	0.39	

注: * 为钾长石主晶和出溶钠长石以比例 3 : 1 计算的均一化碱性长石组成, 长石的平衡温度由 Whitney 等^[3]的二长石温度计计算; 1~13 号薄片为 T110, 14~20 为 T116, 21~30 为 T100; 探针分析由中国地质大学(北京)实验室完成, 仪器型号为 EPMA-1600, 工作条件为: 电压 15 kV, 电流 7.0×10⁻⁹ A, 束斑直径 1 μm; ①为计算的均一化碱性长石与斜长石为长石对计算的平衡温度, ②为计算的均一化碱性长石与出溶钠长石条纹为长石对计算的平衡温度

英结构状交生(图 8)。磷灰石和锆石在黑云母中有较多分布(图 7、8)。未蚀变的黑云母都显示强烈的多色性, N_g' 为深棕褐色, N_p' 为浅黄褐色。黑云母的绿泥石化和绿帘石化较普遍, 同时析出粉尘状磁铁矿分布在其内部或周边。



黑云母内有针状锆石(箭头 1), 其边部与蠕英状石英交生, 构成似蠕英状结构(箭头 2)

图 8 中粗粒基质中的黑云母

Fig. 8 Biotite in Medium- to Coarse-grained Matrix

表 2 中 2~4 号黑云母是被包裹在球斑中的, 而 5~8 号是中粗粒基质中的, 1 号为细粒基质中的。不同产状的黑云母虽有成分差异, 但都显示出富铁的特征, 在 $Mg-R^{3+}-(Fe^{2+}+Mn^{2+})$ 分类图^[4]上属于铁叶云母和 Fe^{2+} -黑云母, $w(TFeO)/w(TFeO+MgO)$ 都在 0.80 以上, 最大的达 0.96。黑云母的富铁特征在细粒基质中最强, 球斑中较弱, 中粗粒基质中居中。

3 岩石学意义

3.1 岩浆结晶过程

塔塔楞环斑花岗岩的结构显示岩浆结晶大体经历了 4 个阶段, 第一阶段结晶矿物被包裹在球斑内, 其组合为黑云母、斜长石和圆粒状石英。经历了该阶段结晶后岩浆中的钾长石组分增加, 达到过饱和, 岩浆结晶进入第二阶段, 这是钾长石球斑的主要形成阶段, 它包裹了早期结晶的斜长石、石英和黑云母。随后为钾长石、斜长石、黑云母、石英共同生长期, 球斑的斜长石环边及球斑内侧与环边斜长石光性方位一致的斜长石晶(图 5)应是斜长石与钾长石同时生长的记录。分布在球斑内、具有象形文字状同时消光的石英(图 6)应是和钾长石同时结晶的结构表现。中粗粒基质也应是这一阶段形成的, 黑云母和石英呈似蠕英结构状的交生(图 8), 应

是黑云母和石英同时结晶的表现, 而这一阶段局部出现的石英熔蚀结构, 说明结晶的同时伴有较快速的减压过程, 可能是正在结晶的岩浆上侵引起的。最后结晶的产物应为分布在中粗粒基质矿物间隙的囊状具细粒、显微文象状结构的长英质矿物集合体(图 4)。他们应是快速结晶的产物, 引起快速结晶的原因或是快速上升, 或是构造作用使挥发分突然释放, 或是两者兼而有之。

镜下观察表明, 钾长石主晶内多含出溶钠长石条纹(图 5、6), 体积分数为 25% 左右。从岩浆中结晶出来时, 这些钠长石条纹应是熔在主晶内, 而显示一个均匀碱性长石相。如果知道钾长石主晶和出溶钠长石成分及各自的体积分数, 就可以求得均一化碱性长石组成。它应是从岩浆结晶出来时的碱性长石组成。计算的不同产状均一化碱性长石列于表 1 中。均一化球斑钾长石成分的平均组成为 $Or_{69.61}Ab_{29.59}An_{0.80}$, 中粗粒基质中均一化钾长石平均组分为 $Or_{71.50}Ab_{27.94}An_{0.56}$, 细粒基质中的均一化钾长石平均组分为 $Or_{72.63}Ab_{26.47}An_{0.90}$ 。可见从早到晚碱性长石的互溶程度显示降低趋势, 应是结晶温度降低引起的。不同产状斜长石的 An 值大体上显示从早到晚变小的趋势, 球斑内自形斜长石的 An 为 25.98~29.41, 平均为 27.75。中粗粒基质中的 An 平均为 25.66, 而细粒基质中的 An 为 11.98, 应是结晶温度下降并发生了结晶演化的表现。黑云母中的铁相对于镁的富集程度从早到晚逐渐增强, 球斑中被包裹的黑云母的 $w(TFeO)/w(TFeO+MgO)$ 为 0.80~0.81, 而中粗粒基质中的为 0.83~0.93, 细粒基质中的为 0.96(表 2), 也表现出结晶分异的变异特征。

利用二长石温度计可计算平衡共生长石形成温度, 钾长石主晶与出溶钠长石对应记录长石出溶时的温度。假定压力为 0.1 GPa, 应用文献[3]给出的二长石温度计获得不同产状碱性长石出溶温度为 322℃~424℃(表 1)。由计算的均一化碱性长石与相邻的斜长石构成的二长石矿物对记录的应为岩浆结晶温度, 得到的温度为 630℃~797℃(表 1), 其中推算的 3 个球斑钾长石与包裹其中的斜长石矿物对的温度分别为 796℃、769℃和 797℃(表 1), 平均为 787.3℃, 中粗粒基质的 2 个结晶温度分别为 747℃和 769℃(表 1), 平均为 758℃, 而细粒基质的结晶温度为 630℃(表 1)。显示从早到晚结晶温度下降, 具岩浆结晶分异的特征。

表 2 黑云母化学成分及标准化学式

Tab. 2 Chemical Composition and Standard Chemical Formula of Biotite

$w_B/\%$

样品	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO ₂	35.62	37.02	36.61	35.92	34.83	34.71	36.39	35.61	37.51	34.06	34.90	36.09
TiO ₂	1.45	2.40	2.51	3.09	3.72	3.05	1.89	3.70	1.05	3.05	2.82	2.87
Al ₂ O ₃	18.97	15.08	14.19	14.45	15.03	15.72	15.63	14.81	15.19	14.83	11.44	13.28
TFeO	28.12	25.21	25.58	26.79	29.32	30.13	26.71	29.7	22.51	30.47	35.43	18.23
Fe ₂ O ₃	2.78	7.28	7.67	7.01	6.33	5.24	4.89	3.70	8.28	17.17	3.99	4.06
FeO	25.62	18.65	18.68	20.48	23.63	22.00	25.73	26.37	15.06	13.30	31.44	14.17
MnO	0.64	0.36	0.47	0.41	0.57	0.20	0.51	0.00	0.12	0.35	0.15	0.33
MgO	1.18	6.41	6.38	6.09	2.37	2.37	5.31	2.92	9.44	3.40	2.80	14.69
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.18	0.08	0	0.40	0.19	1.54
Na ₂ O	0.49	0.41	0.46	0.25	0.56	0.37	0.52	0.53	0.27	0.23	0.41	0.30
K ₂ O	9.06	9.4	9.06	8.8	9.12	8.62	8.54	8.44	9.30	7.53	8.38	6.81
H ₂ O ⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.21	5.13
H ₂ O ⁻	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.78	0.04	0
TFeO/TFeO+MgO	0.96	0.80	0.80	0.81	0.93	0.93	0.83	0.91	0.70	0.90	0.93	0.55
Σ	95.54	96.29	95.26	95.80	95.52	95.21	95.68	95.79	95.39	100.10	99.77	99.87
Si	2.928 4	2.952 7	2.960 6	2.992 2	2.882 0	2.888 2	2.940 0	2.942 2	2.950 4	2.671 4	2.837 1	2.727 5
Al	1.071 6	1.047 3	1.039 4	1.007 8	1.118 0	1.111 8	1.060 0	1.057 8	1.049 6	1.328 6	1.096 1	1.182 9
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.068 8	0.089 6
Σ	4.000 0	4.000 0	4.000 0	4.000 0	4.000 0	4.000 0	4.000 0	4.000 0	4.000 0	4.000 0	4.000 0	4.000 0
Al	0.765 4	0.371 5	0.312 1	0.183 1	0.347 8	0.427 2	0.429 4	0.378 9	0.359 4	0.042 2	0	0.000 0
Ti	0.088 9	0.143 8	0.150 7	0.195 1	0.233 5	0.189 9	0.116 4	0.228 2	0.063 8	0.180 0	0.105 7	0.073 6
Fe ³⁺	0.115 7	0.404 3	0.432 2	0.405 1	0.361 4	0.279 2	0.291 8	0.209 3	0.455 8	0	0	0
Fe ²⁺	1.775 2	1.278 1	1.298 5	1.461 3	1.665 9	1.814 5	1.512 9	1.839 8	1.024 1	0.872 4	2.137 5	0.895 6
Mn	0.044 4	0.024 0	0.032 1	0.029 0	0.039 8	0.015 0	0.034 0	0	0.007 1	0.023 3	0.010 3	0.021 1
Mg	0.143 2	0.762 1	0.768 1	0.755 6	0.293 2	0.294 8	0.640 4	0.357 2	1.106 4	0.397 5	0.339 3	1.655 1
Σ	2.972 8	2.983 8	2.993 7	3.029 2	2.941 6	9.020 6	3.024 9	3.013 4	2.952 8	2.528 8	2.836 9	2.910 4
Ca	0	0	0	0	0	0.005 0	0.014 6	0.006 9	0	0.033 6	0.016 6	0.124 7
Na	0.079 0	0.062 3	0.072 9	0.040 0	0.094 4	0.060 0	0.082 5	0.084 3	0.047 3	0.035 0	0.064 6	0.044 0
K	0.948 1	0.953 9	0.933 4	0.930 7	0.964 0	0.914 4	0.878 1	0.888 1	0.936 2	0.753 4	0.869 1	0.656 6
Σ	1.027 1	1.016 2	1.006 3	0.970 7	1.058 4	0.979 4	0.975 2	0.979 3	0.983 5	0.822 0	0.950 3	0.825 3
OH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.026 5	1.742 1	2.588 3

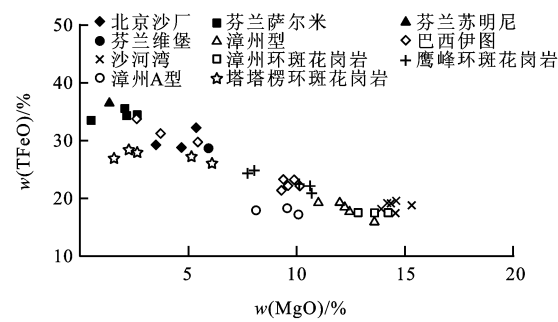
注: 1 号自 T100 薄片; 2~8 号自 T110 薄片, 2~4 号为球斑中的黑云母, 5~8 号为中粗粒基质中的黑云母; 1 号为细粒基质中的黑云母; 9~12 号分别为鹰峰岩体^[5]、密云环斑花岗岩^[6]、芬兰 Wiborg 岩体^[7]、沙河湾岩体^[8]的黑云母, 其中 10~12 为化学分析值, 其余为探针分析值, 分析条件与表 1 相同

3 2 矿物特征对比

从现有报道来看, 无论环斑花岗岩产出的时代及构造背景有多大不同, 其主要矿物总是石英、钾长石、斜长石, 而且钾长石是含量最多的矿物^[2, 5-13], 塔塔楞环斑花岗岩也是如此。经典环斑花岗岩的铁镁矿物有黑云母、角闪石, 部分含有铁橄榄石^[6, 9, 14], 但塔塔楞岩体只含黑云母, 显得单调。这

一点与鹰峰环斑花岗岩^[5, 10, 15]相似。多数环斑花岗岩的副矿物种类较多, 有磷灰石、锆石、独居石、黄玉、褐帘石、萤石等^[6-9], 塔塔楞岩体也显得单调。表 2 中除列出了塔塔楞岩体不同产状黑云母探针分析结果外, 还列出了几个代表性地区环斑花岗岩的黑云母成分。经典环斑花岗岩的黑云母显著特征是富铁、低镁^[6-9], 表现为高的 $w(\text{TFeO})$ 及高的

$w(\text{TFeO})/w(\text{TFeO}+\text{MgO})$ 值。芬兰和密云的环境斑花岗岩都表现得很突出, $w(\text{TFeO})$ 可高达 35.43%, $w(\text{TFeO})/w(\text{TFeO}+\text{MgO})$ 可高达 0.93 (表 2), 但产于造山带沙河湾岩体的黑云母不显示富铁特征, $w(\text{TFeO})$ 仅为 18.23%, 而 $w(\text{MgO})$ 可达 14.69%, $w(\text{TFeO})/w(\text{TFeO}+\text{MgO})$ 仅为 0.55 (表 2)。塔塔楞环斑花岗岩的 $w(\text{TFeO})$ 为 25.21%~30.13%, $w(\text{TFeO})/w(\text{TFeO}+\text{MgO})$ 在 0.80~0.96 之间 (表 2), 明显显示富铁贫镁的特征。图 9 是几个代表性地区环斑花岗岩和非造山带花岗岩的 $w(\text{TFeO})$ - $w(\text{MgO})$ 投影图, 塔塔楞环斑花岗岩投影点与经典环斑花岗岩较接近, 巴西伊图环斑花岗岩产于加里东造山带, 有大的成分变异范围, 漳州的环斑花岗岩和 A 型花岗岩与沙河湾岩体相近。表 2 表明, 与其他地区环斑花岗岩相比, 塔塔楞环斑花岗岩黑云母还有富铝、高钾、低钙特征, 反映在黑云母的分子式上, 八面体阳离子 Al 高, 层间阳离子 K 高, 无 Ca 或低 Ca, 这种特征与鹰峰岩体^[5] 有相似之处, 其原因尚不清楚。



鹰峰岩体资料引自胡能高^[5], 其余转引自王晓霞等^[8]

图 9 环斑花岗岩及相关岩石的黑云母 TFeO-MgO 相关性

Fig. 9 TFeO vs. MgO Plot of Biotite from Rapakivi Granite and Related Rocks

经典环斑花岗岩多产于克拉通内, 非造山环境下, 是高侵位高温岩浆结晶的产物, 具有 A 型花岗岩的特征^[9], 而高温结晶的碱性长石多具 K-Na 高混溶的特征。由于这些岩体多地处构造稳定区, 岩体形成后多无变质、变形改造, 故岩浆结晶的碱性长石能新鲜保存下来。芬兰 Wiborg 岩体具有 Wiborgitic 型结构的球斑, 多无钠质长石出溶, 保持了均一相, 其组分为 $\text{Or}_{168.29} \text{Ab}_{30.19} \text{An}_{1.52}$ ^[12], 具有 Pyterlitic 型结构的球斑组成为 $\text{Or}_{69.78} \text{Ab}_{29.00} \text{An}_{1.13}$, 基质钾长石为 $\text{Or}_{73.42} \text{Ab}_{24.99} \text{An}_{1.59}$ ^[13]。塔塔楞环斑花岗岩中不同产状钾长石内都广泛出溶钠

长石条纹是明显不同于经典环斑花岗岩的一个特点, 这与其所处的构造背景活动性强及受到成岩后的热事件改造有关。同处在柴北缘构造带中的鹰峰岩体在许多方面与经典环斑花岗岩一致, 但其中的钾长石也广泛发育条纹结构^[5, 10], 表现出其个性。表 1 列出了计算的均一化碱性长石的组成, 表明均一化球斑钾长石的平均组分为 $\text{Or}_{69.61} \text{Ab}_{29.59} \text{An}_{0.80}$, 中粗粒基质为 $\text{Or}_{71.50} \text{Ab}_{27.94} \text{An}_{0.56}$, 细粒基质为 $\text{Or}_{72.63} \text{Ab}_{26.47} \text{An}_{0.90}$, 也显示了碱性长石 K-Na 高混溶的特点, 与 Wiborg 岩体相似。从球斑钾长石经中粗粒基质钾长石到细粒基质钾长石其互溶程度依次减弱, 这种变异特征也与 Wiborg 岩体相似。沙河湾岩体的球斑显示了成分环带的特征, 球斑中心混溶程度低, 而边部混溶程度高, 其组分分别为 $\text{Or}_{95.25} \text{Ab}_{4.50} \text{An}_{0.25}$ 和 $\text{Or}_{83.87} \text{Ab}_{14.40} \text{An}_{1.70}$, 王晓霞^[16] 认为这是由较基性岩浆混入正在结晶着的花岗岩浆引起的。

斜长石在经典环斑花岗岩中的成分有较大的范围, 以更长石为主, 还有少量的中长石^[9], 塔塔楞环斑花岗岩中斜长石的 An 值为 11.94~29.41, 较高号码的接近中性长石。一些被包裹在球斑中的自形斜长石蚀变产物中有较多帘石, 未蚀变时的号码可能达到低号中长石。斜长石的双晶都很发育, 且以复合双晶为主, 这也与经典环斑花岗岩一致。在环斑花岗岩中石英的多世代性很明显, 这一点在塔塔楞环斑花岗岩中也有较佳显示, 熔蚀结构及石英以多种产状产出就是证据。

4 结语

(1)塔塔楞环斑花岗岩主要由钾长石、斜长石、石英、黑云母等矿物组成, 且这些矿物都具有多种产状, 反映了岩浆结晶多阶段的特征。最早结晶的是被包裹在钾长石球斑中的斜长石、黑云母、石英, 随后主要为钾长石球斑结晶, 接着是钾长石球斑环边形成和中粗粒基质结晶, 最后是细粒基质结晶。

(2)塔塔楞岩体的黑云母属于富铁种属, 与经典环斑花岗岩相近。如果把钾长石与出溶钠长石条纹均一化得出的碱性长石作为从岩浆结晶的长石, 那么塔塔楞环斑花岗岩的钾长石也具 K-Na 强烈混溶性质, 其成分特征与经典环斑花岗岩也是相似的。斜长石的成分以更长石为主, 也与多数环斑花岗岩的成分一致。

(3)塔塔楞岩体结晶从早到晚, 黑云母的铁相

对于镁的富集程度增加, $w(\text{TFeO})/w(\text{TFeO} + \text{MgO})$ 从 0.80 增加到 0.96。斜长石的 A_n 值从 29.41 降低到 11.94, 而碱性长石的组成从 $\text{O}_{169.61} \text{Ab}_{29.59} \text{An}_{0.80}$ 变为 $\text{O}_{172.63} \text{Ab}_{26.47} \text{An}_{0.90}$, 所有这些变异都与岩浆的降温结晶演化一致。由二长石温度计计算的平衡温度由早期的平均 $787.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到最晚期的 $630\text{ }^{\circ}\text{C}$, 这些都表明, 塔塔楞岩体形成过程中存在有效的结晶演化过程。

参考文献:

[1] 卢欣祥, 孙延贵, 张雪亭, 等. 柴达木盆地北缘塔塔楞环斑花岗岩的 SHRIMP 年龄[J]. 地质学报, 2007, 81(5): 626-634.

[2] 胡能高, 王晓霞, 孙延贵, 等. 柴达木盆地北缘塔塔楞环斑花岗岩的岩相学和地球化学特征[J]. 地质通报, 2008, 27(11): 1923-1932.

[3] Whitney J A, Stormer J C. The Distribution of $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ Between Coexisting Microcline and Plagioclase and Its Effect on Geothermometric Calculations[J]. American Mineralogist, 1977, 62: 687-691.

[4] 张儒瓊, 从柏林. 矿物温度计和矿物压力计[M]. 北京: 地质出版社, 1983.

[5] 胡能高, 王晓霞, 孙延贵, 等. 柴北缘鹰峰环斑花岗岩矿物学特征及其岩石学意义[J]. 矿物学报, 2007, 27(2): 195-204.

[6] 郁建华, 傅会芹, 张凤兰, 等. 华北地台北部非造山环斑花岗岩及有关岩石[M]. 北京: 中国科学出版社, 1996.

[7] Rieder M, Haapala I, Povondra P. Mineralogy of Dark Mica

from the Wiborg Rapakivi Granite Batholiths, Southeastern Finland[J]. European Journal of Mineralogy, 1996, 8: 593-605.

[8] 王晓霞, 卢欣祥. 秦岭沙河湾环斑花岗岩中黑云母的研究及意义[J]. 矿物岩石, 1998, 17(4): 352-358.

[9] Rämö O T, Haapala I. One Hundred Years of Rapakivi Granite[J]. Mineralogy and Petrology, 1995, 52: 129-146.

[10] 胡能高, 申文环, 王晓霞, 等. 柴达木盆地北缘鹰峰环斑花岗岩的岩相学特征及相关问题的讨论[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(4): 1-9.

[11] 王晓霞, 王涛, 卢欣祥, 等. 北秦岭老君山、秦岭梁环斑结构花岗岩岩浆混合的岩相学证据及其意义[J]. 地质通报, 2002, 21(8/9): 523-529.

[12] Vorma A. Alkali Feldspars of the Wiborg Rapakivi Massif in Southeastern Finland[J]. Bulletin de la Commission Géologique de Finlande 1971, 246: 8-72.

[13] Vorma A. On the Petrochemistry of Rapakivi Granites with Special Reference to the Laitila Massif[J]. Geological Survey of Finland, 1976, 285: 6-53.

[14] Simonen A, Vorma A. Amphibole and Biotite from Rapakivi Granite[J]. Bulletin de la Commission Géologique de Finlande, 1969, 238: 5-28.

[15] 胡能高, 王晓霞, 孙延贵, 等. 柴北缘元古宙鹰峰环斑花岗岩及其共生岩石的地球化学特征及地质意义[J]. 地质论评, 2007, 53(4): 460-472.

[16] 王晓霞, 卢欣祥. 北秦岭沙河湾环斑结构花岗岩的矿物学特征及其岩石学意义[J]. 矿物学报, 2003, 23(1): 57-62.

本刊荣获 2008 年“中国科技论文在线优秀期刊”二等奖

为了推动科技期刊的数字化建设, 提高期刊刊载论文的引用率, 扩大期刊的影响力, 促进论文免费共享, 建设良好的科研环境, 教育部科技发展中心根据“中国科技论文在线优秀期刊”评选指标体系, 对已收录在“中国科技论文在线”科技期刊栏目的各类期刊就期刊的影响因子和他引率、网站收录论文数和下载量、期刊入网的完整性及期刊编委的国际化程度等统计分析, 经过严格评审, 共评出 2008 年“中国科技论文在线优秀期刊”一等奖 15 名, 二等奖 39 名。《地球科学与环境学报》被评为二等奖(排第二名)。