

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.03.08

引用格式: 李少文,周传芳,杨华本,等. 新疆且末县青塔山岩体地球化学特征及其地质意义[J]. 中国地质调查, 2024, 11(3): 59–67. (Li S W, Zhou C F, Yang H B, et al. Geochemical characteristics and geological significance of Qingtashan rock mass in Qiem County of Xinjiang[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(3): 59–67.)

新疆且末县青塔山岩体地球化学特征及其地质意义

李少文^{1,2}, 周传芳^{1,2*}, 杨华本^{1,2}, 王久懿^{1,2}, 梁中恺^{1,2}

(1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086; 2. 自然资源部
哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要: 青塔山岩体位于东昆仑山西部, 岩体的形成时代、环境、岩石类型尚存在争议, 对于其成岩的物理化学条件和源区特征的研究程度较低。在系统开展岩石学和岩相学研究的基础上, 对黑云母、斜长石和角闪石等主要造岩矿物进行了成分分析, 厘定其成岩的物理化学条件, 进一步约束岩石成因。研究表明: 青塔山岩体的岩性为英云闪长岩, 脉体岩性为石英闪长岩; 岩体中斜长石为中长石和拉长石, 黑云母为镁质黑云母, 角闪石为镁角闪石, 斜长石发育反环带, 应为岩浆混合所致; 黑云母的结晶温度为 684 ~ 693 °C, 结晶压力为 $(1.86 \sim 2.01) \times 10^8$ Pa, 平均值为 1.92×10^8 Pa, 对应结晶深度为 6.90 ~ 7.46 km, 平均 7.12 km, 属于中深成相。岩体形成时氧逸度较低, 为 -17.34 ~ -17.04。矿物化学特征显示, 青塔山岩体中黑云母的物质来源为钙碱性造山岩套, 其形成与壳幔混源岩浆有关。研究成果可为研究青塔山地区晚三叠世—早侏罗世岩浆演化历史提供依据。

关键词: 英云闪长岩; 电子探针; 斜长石环带; 矿物温压计; 昆仑山

中图分类号: P571; P578.968; P575.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8706(2024)03-0059-09

0 引言

青塔山岩体位于青藏高原北缘, 东昆仑山西部, 属塔里木东南缘及其东南构造岩浆亚省。因其所处区域自然环境恶劣、人迹罕至, 青塔山岩体的整体地质研究程度较低, 尤其是岩浆岩的形成时代、环境、岩石类型等存在争议^[1]。亓鹏^[2]将青塔山岩体划分为英云闪长岩((212 ± 1.5) Ma)和含石榴子石英云闪长斑岩((214 ± 1) Ma)两种岩性, 认为青塔山岩体为晚三叠世侵入体, 但尚未讨论其形成时的温度和压力条件。花岗质岩石组成矿物(如斜长石、角闪石、黑云母)的化学成分特征能够有效地反映壳幔岩浆混合的过程及岩浆形成过程中的物理化学性质。本文在系统的野外调查和岩相学观察的基础上, 针对斜长石、黑云母和

角闪石开展电子探针分析, 厘定岩体矿物形成的物理化学条件和岩浆演化特征, 探讨岩体的成因类型和源区性质, 为青塔山岩体造山过程中的岩浆活动提供矿物尺度的制约, 进而为研究青藏高原北缘阿尔金—昆仑山构造接合带的构造演化历史提供参考。

1 地质概况

研究区位于青藏高原北缘, 东昆仑山西段, 其行政区划属于新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州且末县管辖。大地构造位置属于华北—塔里木板块(I级), 昆仑陆块(Ⅱ级), 昆南微陆块(或称五泉包—甘泉河构造区)^[3]。昆南微陆块的整体构造形态为双层结构, 晚古生代沉积盖层叠加在元古界结晶基底之上。晚古生代为造山带前陆盆地, 属于多岛小

收稿日期: 2023-03-01; 修订日期: 2024-02-04。

基金项目: 中国地质调查局“东北多年冻土区 1:25 万地表基岩调查(编号: DD20242507)”项目资助。

第一作者简介: 李少文(1995—), 男, 工程师, 主要从事区域地质矿产、生态地质、地表基岩调查工作。Email: 791257118@qq.com。

通信作者简介: 周传芳(1985—), 男, 正高级工程师, 主要从事区域地质矿产、生态地质、自然资源调查研究工作。Email: 546011015@qq.com。

洋盆东古特提斯洋的一部分。早石炭世为一套火山碎屑岩建造,晚二叠世则为陆源碎屑岩和碳酸盐岩建造。晚二叠世的海西运动导致洋盆闭合消亡,在晚古生代盖层中形成一系列褶皱与断层。

青塔山岩体出露于研究区中部,出露面积约 35 km^2 (图 1)。岩体沿 NW 向展布,平面形态接近不规则状延长的椭圆形,呈岩株状产出。空间上,岩体北东侧被断裂破坏,展布走向与区域断裂构造线方向一致,具明显的线性特征。岩体南侧被第四系覆盖,北东侧被断裂切割,与围岩之间界线明显。岩体的围岩为下一中二叠统树维门科组碎屑岩,岩石热变质现象显著。

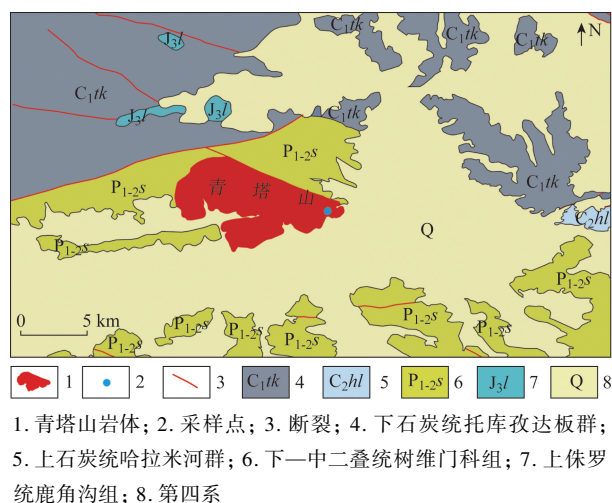


图 1 研究区地质简图

Fig. 1 Geological sketch of the study area

2 岩体特征与分析方法

2.1 岩体特征

样品采集于青塔山岩体东南部(图 1),共计 8 件样品,其中岩体样品 6 件,脉体样品 2 件。岩体呈岩株状产出(图 2(a)),岩石风化面为灰绿色,新

鲜面为灰白色,块状构造,中细粒结构,风化较为强烈。岩体中段出现与整个岩体区别较大的细粒脉体(图 2(b)),呈深绿色,全晶质结构,块状构造。岩体内含有一定数目的深色包体(图 2(c)),包体呈枕状、椭圆状,边缘较细,界线光滑,具定向性,反映了基性包体在形成时是作为一种高温的偏基性岩浆球滴进入较低温的酸性岩浆中。根据包体的形态,可以确定岩浆的混合作用以物理混合为主^[4]。

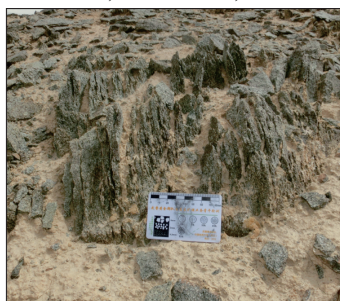
青塔山岩体主要由斜长石、石英、黑云母、角闪石及少量的钾长石、榍石、磁铁矿组成。斜长石呈半自形板状(图 2(d)),聚片双晶与环带结构发育(图 2(e),(f)),少部分具有绢云母化特征,粒径 $0.2 \sim 1 \text{ mm}$,含量 55%;钾长石呈半自形—自形板状,具卡式双晶,粒径 $0.2 \sim 1 \text{ mm}$,含量较少,占 3%;石英为它形粒状,粒径 $0.1 \sim 1 \text{ mm}$,含量为 16%;黑云母呈半自形—自形板状,粒径 $0.5 \sim 1.5 \text{ mm}$,含量为 15%;角闪石为半自形板状,粒径 $0.2 \sim 1 \text{ mm}$,含量为 8%。

青塔山脉体镜下为微粒结构(图 2(f)),整体呈暗色透明状,夹杂约 5% 的暗色金属矿物,主要矿物有斜长石、角闪石和石英,同时含有少量辉石。除石英外所有矿物都遭受了较为强烈的蚀变。斜长石含量约 60%,局部可观察到仍具有斜长石轮廓的大部分矿物已经绢云母化,部分完整矿物中可见双晶。石英无色透明,半自形,含量约为 7%。暗色矿物以角闪石为主,角闪石多呈短柱状、针状,含量约 20%,多数遭受蚀变、绿泥石化。其他矿物为黑云母和辉石,共占约 8%。

通过统计斜长石、钾长石以及石英的含量,发现青塔山岩体在中酸性侵入岩的 QAP 图解^[5-7]中位于英云闪长岩区域(图 3),与亓鹏^[2]的认识一致,青塔山岩体中脉体的岩性为石英闪长岩。



(a) 青塔山岩体



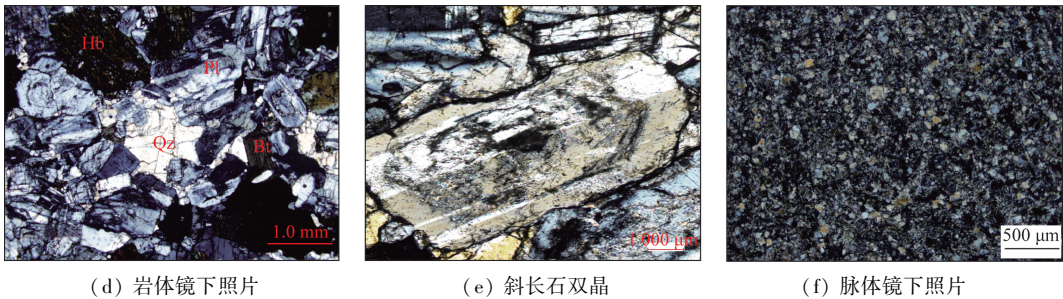
(b) 青塔山脉体



(c) 包体

图 2-1 青塔山岩体野外及镜下照片

Fig. 2-1 Field and microscope photos of Qingtashan rock mass



PL. 斜长石; Qtz. 石英; Bt. 黑云母; Hb. 角闪石
图 2-2 青塔山岩体野外及镜下照片

Fig. 2-2 Field and microscope photos of Qingtashan rock mass

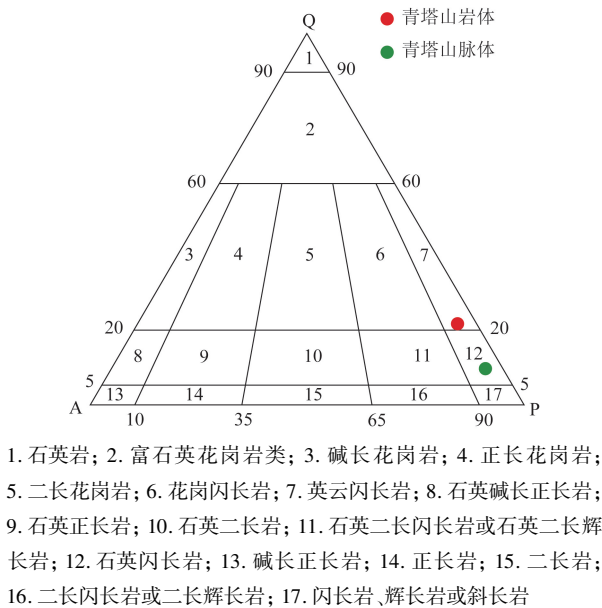


图 3 青塔山岩体及脉体 QAP 图解

Fig. 3 QAP diagram of Qingtashan rock mass and granulite dike

2.2 分析方法

在详细的岩相学观察的基础上,圈定新鲜的斜长石、黑云母和角闪石用于电子探针测试。测试由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,测试仪器为 JEOL EPMA8230 电子探针分析仪,测试精度为 0.01%。为确定选定斜长石的成分分布,以斜长石矿物中心为起点,经过环带到达斜长石边部,共计 13 个点(图 4),样品点编号依次为 PL-01 ~ PL-13。

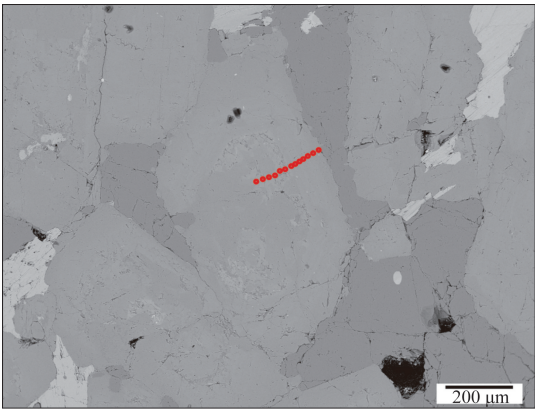


图 4 青塔山岩体斜长石电子探针打点位置
Fig. 4 Electron microprobe point of plagioclases in Qingtashan rock mass

3 矿物地球化学特征

3.1 斜长石

青塔山岩体斜长石电子探针分析结果见表 1。样品斜长石的成分均匀,FeO、TiO₂、MnO、MgO、NiO 含量均较低,表明相关元素的类质同象现象较少。根据结果中的 Ca、Na、K 含量,计算出 Ca²⁺、Na⁺、K⁺ 离子数,得到斜长石的 An 值为 42.68% ~ 66.41%,Ab 值为 33.05% ~ 56.70%,Or 值较低,为 0.21% ~ 3.11%,在斜长石分类投影图(图 5(a))中,青塔山岩体的斜长石为中长石和拉长石^[8-9]。

表 1 青塔山岩体斜长石电子探针分析结果

Tab. 1 Electron microprobe analysis results of plagioclases in Qingtashan rock mass

样品编号	以 8 个氧原子计的离子数					Ab 值/%	Or 值/%	An 值/%
	Si	Al	Ca	Na	K			
PL-01	2.56	1.45	0.42	0.55	0.01	56.50	0.80	42.70
PL-02	2.56	1.45	0.42	0.55	0.01	56.70	0.60	42.70

续表

样品编号	以 8 个氧原子计的离子数					Ab 值/%	Or 值/%	An 值/%
	Si	Al	Ca	Na	K			
PL-03	2.57	1.43	0.42	0.55	0.01	56.20	0.60	43.30
PL-04	2.38	1.65	0.58	0.36	0.02	37.40	2.50	60.00
PL-05	2.43	1.59	0.55	0.40	0.00	41.80	0.40	57.70
PL-06	2.34	1.70	0.62	0.31	0.01	33.00	0.60	66.40
PL-07	2.39	1.64	0.57	0.36	0.03	37.50	3.10	59.40
PL-08	2.36	1.67	0.59	0.35	0.01	36.80	1.30	61.90
PL-09	2.42	1.60	0.55	0.41	0.01	42.30	0.50	57.20
PL-10	2.43	1.59	0.54	0.42	0.00	43.90	0.40	55.70
PL-11	2.44	1.58	0.53	0.43	0.00	44.70	0.30	55.10
PL-12	2.44	1.58	0.54	0.43	0.00	44.30	0.20	55.40
PL-13	2.56	1.46	0.41	0.55	0.01	56.70	0.50	42.80

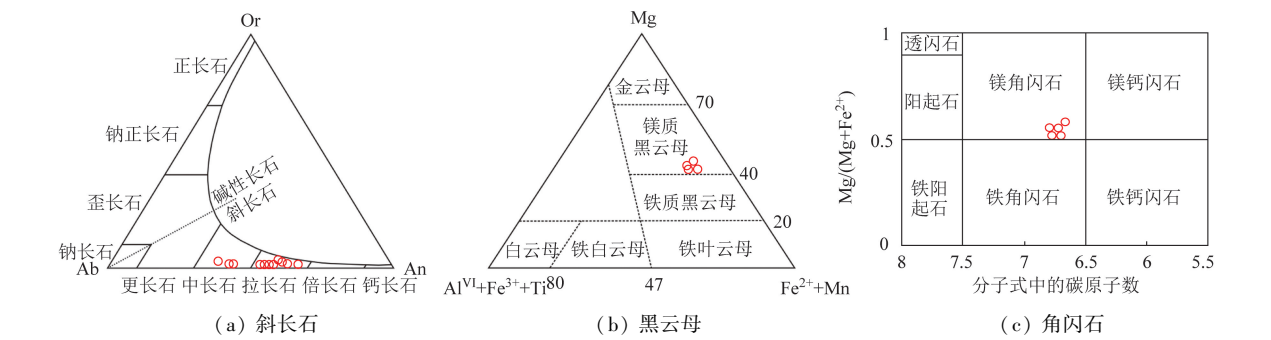


图 5 青塔山岩体中英云闪长岩的矿物分类投影图

Fig. 5 Mineral classification diagram of tonalites in Qingtashan rock mass

3.2 黑云母

黑云母电子探针分析结果^[10-12]见表 2。样品黑云母的成分较为均匀,CaO 含量较低,显示出贫 Ca 特征,表明黑云母较少受到岩浆期之后由于初生变质或大气流体循环而引起的绿泥石化和绢云

母化蚀变影响^[13-14],应为原生岩浆成因黑云母。黑云母分类投影(图 5(b))显示,青塔山岩体中的黑云母为镁质黑云母,同时靠近铁质黑云母区域,由于测试样品数量不多,因此有可能为二者之间的过渡类型。

表 2 青塔山岩体黑云母电子探针分析结果

Tab. 2 Electron microprobe analysis results of biotites in Qingtashan rock mass

样品编号	以 22 个氧原子计的离子数											A* 值/ %	M* 值/ %	F* 值/ %
	Si	Ti	Al	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	Al ^{VI} + Fe ³⁺ + Ti	Fe ²⁺ + Mn			
Bt-1	5.56	0.35	2.78	2.58	0.03	2.46	0.00	0.05	1.8	0.69	2.61	12.05	42.61	45.34
Bt-2	5.48	0.35	2.82	2.64	0.03	2.54	0.01	0.05	1.72	0.66	2.67	11.23	43.28	45.49
Bt-3	5.53	0.37	2.79	2.56	0.02	2.48	0.00	0.06	1.82	0.69	2.58	12.03	43.12	44.86
Bt-4	5.54	0.37	2.79	2.58	0.02	2.45	0.01	0.07	1.80	0.70	2.61	12.11	42.60	45.29
Bt-5	5.53	0.35	2.77	2.72	0.02	2.42	0.01	0.04	1.77	0.65	2.75	11.19	41.58	47.22

注:A*为 Al^{VI} + Fe³⁺ + Ti,M*为 Mg,F*为 Fe²⁺ + Mn。

3.3 角闪石

角闪石电子探针分析结果^[10-12]见表 3。样品角闪石中的 FeO 含量较高,为 15.61% ~ 19.13%,MgO 含量的 10.96% ~ 12.17%,CaO 含量

8.93% ~ 10.45%。样本均满足 CaB ≥ 1,(Na + K)A < 0.5 的条件,根据 Leaked 等^[15]的分类,青塔山岩体岩石样本中的角闪石为镁角闪石(图 5(c))。

表3 青塔山岩体角闪石电子探针分析结果

Tab.3 Electron microprobe analysis results of amphiboles in Qingtashan rock mass

样品编号	以23个氧原子计的离子数											Mg [#] 值/%
	Si	Al	Ti	Cr	Mg	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Ca	Na	K	
Am-1	6.70	1.32	0.13	0.00	2.51	1.95	0.34	0.05	1.37	0.28	0.06	0.52
Am-2	6.78	1.40	0.11	0.00	2.38	1.52	0.75	0.07	1.49	0.27	0.07	0.51
Am-3	6.74	1.42	0.18	0.01	2.52	1.24	0.85	0.05	1.55	0.30	0.08	0.55
Am-4	6.66	1.57	0.20	0.01	2.64	1.08	0.82	0.03	1.63	0.29	0.07	0.58
Am-5	6.78	1.43	0.15	0.00	2.52	1.16	0.91	0.06	1.59	0.27	0.09	0.55

注：Mg[#]为 Mg/(Mg + Fe²⁺)。

4 讨论

4.1 斜长石环带特征

青塔山岩体英云闪长岩中斜长石环带沿探针扫描线的 An 值变化曲线见图 6(a),斜长石晶体由 3 个部分组成,位于中心的 3 个点 PL-01、PL-02、PL-03 的含量基本一致且较为稳定,PL-04~PL-12 含量接近但出现了小范围波动,位于晶体边缘的 PL-13 的 An 值出现了明显的降低。根据电子探针分析结果得到的斜长石分类投影图(图 5(a))可知,中心的 3 个点位 PL-01、PL-02、PL-03 代表的核心部分与晶体边缘的成分一致,为中长石,其余点位则为拉长石。

由图 6(b)可以观察到,由中心到边缘,斜长石

的 FeO 含量随着远离中心而波动,但没有特别突出的峰值,An 值和 FeO 含量在 PL-04、PL-06、PL-08 点位(对应 An 值的 3 个峰值)都出现增加。忽略受仪器检出限限制而导致部分点位的 Mg 含量为 0,能够观察到的 Mg 含量峰值(图 6(c))也基本对应着 An 值的峰值(图 6(a)),证明 Mg 含量与 An 值及 FeO 含量的变化基本同步^[16]。

总体上看,斜长石样品的 An 值先增后减,分别呈现反环带、正环带的特点。考虑到 Fe、Mg 等元素含量变化基本与 An 值的变化一致或具有相关性,结合岩体中发育有暗色包体的特征,推断该斜长石环带的产生是由于在岩浆结晶过程中,后续较热的偏基性岩浆和较冷的已结晶出斜长石的偏酸性岩浆发生了混合,从而使斜长石内部形成溶蚀结构,并产生反环带的特点^[17]。

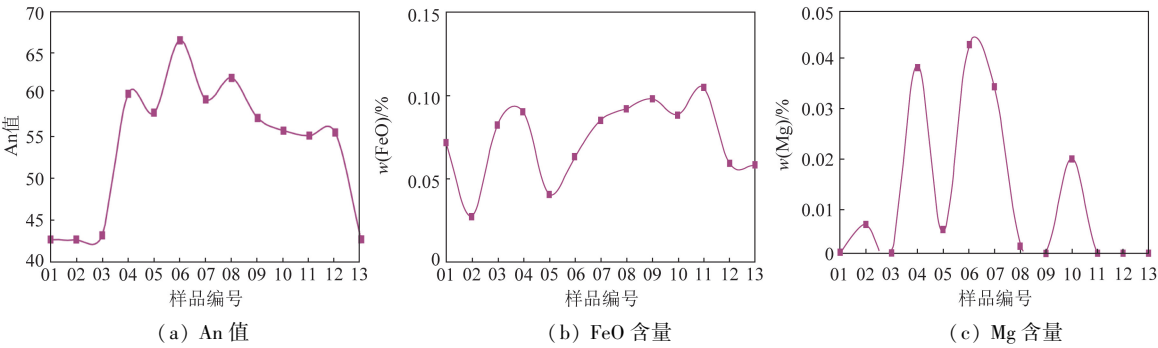


图6 斜长石线扫描分析变化曲线

Fig.6 Line scanning analysis change curve of plagioclases

4.2 岩浆结晶的物理化学特征

4.2.1 压力

角闪石全铝压力计和黑云母全铝压力计是估算花岗岩类岩石形成压力的常用工具,黑云母的成分变化也可以很好地反映其源区寄主岩浆物理化学性质的演化情况^[22-24]。角闪石全铝压力计需要斜长石的 An 值为 25~35^[18-21],不适用于青塔山岩体使用,因此本文使用黑云母全铝压力计对

黑云母的结晶压力和深度进行估算^[25],公式为

$$P = 3.03 \times K_{Al} - 6.53 (\pm 0.33) \quad (1)$$

式中: P 为结晶压力, $\times 10^8$ Pa; K_{Al} 为基于 22 个氧原子为基础计算的黑云母中 Al 的阳离子数。计算结果显示青塔山岩体英云闪长岩中黑云母的结晶压力为 $(1.86 \sim 2.01) \times 10^8$ Pa,平均值为 1.92×10^8 Pa。

岩浆结晶深度计算公式^[26]为

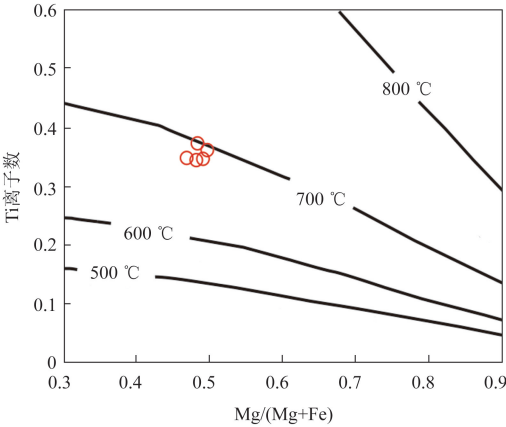
$$n = P/1\,000 \cdot \rho g \quad (2)$$

式中： n 为结晶深度， km ； ρ 为地壳平均密度，近似取 $2\,750\,\text{kg}/\text{m}^3$ ； g 为重力加速度，取 $9.8\,\text{m}/\text{s}^2$ 。计算结果显示黑云母结晶深度为 $6.90\sim7.46\,\text{km}$ ，平均 $7.12\,\text{km}$ ，属于中深成相^[27]。

4.2.2 结晶温度

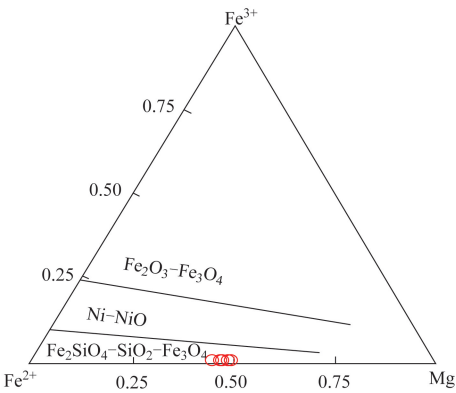
结晶温度的计算根据 Henry 等^[28] 的黑云母 $\text{Ti}-\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ 温度计公式为

$$T = \{ [\ln(K_{\text{Ti}}) - a - c(X_{\text{Mg}})^3] / b \}^{0.333} \quad (3)$$

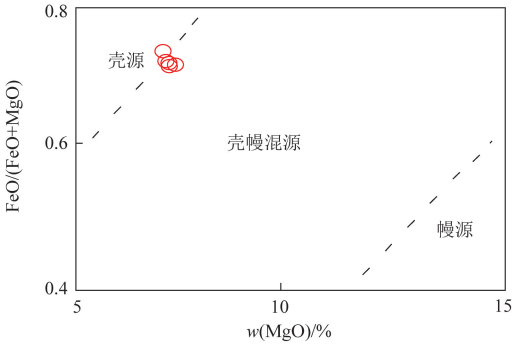


(a) $\text{Ti}-\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ 图解

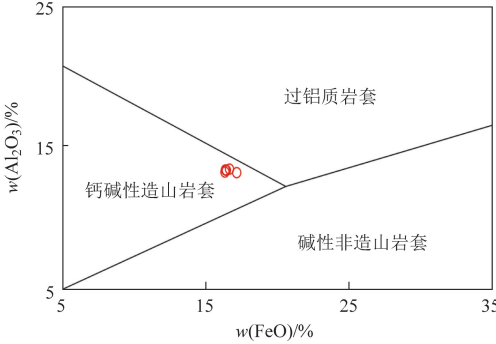
式中： T 为温度， $^{\circ}\text{C}$ ； K_{Ti} 是以 22 个氧原子为基础计算的黑云母中 Ti 的阳离子数； $X_{\text{Mg}} = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ ； a 、 b 、 c 均为 Henry 等^[28] 计算的曲面拟合方程系数，其中 $a = -2.359\,4$ ， $b = 4.648\,4 \times 10^{-9}$ ， $c = -1.728\,3$ 。在计算中以 $X_{\text{Mg}} = 0.275\sim1.000$ 、 $K_{\text{Ti}} = 0.040\sim0.600$ 、 $T = 400\sim800\,^{\circ}\text{C}$ 为准确的校正范围。最终得到青塔山英云闪长岩中黑云母的结晶温度为 $684\sim693\,^{\circ}\text{C}$ (图 7(a))。



(b) $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}^{2+}$ 图解



(c) $\text{MgO}-\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ 图解



(d) $\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解

图 7 青塔山英云闪长岩黑云母指示图解

Fig. 7 Indicative diagram of biotites in Qingtashan rock mass

4.2.3 氧逸度

黑云母的化学成分也可以反映岩浆-热液体系的物理化学条件^[29]，青塔山英云闪长岩的黑云母电子探针结果显示其 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值极低，小于 0.01， $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}^{2+}$ 图解 (图 7(b)) 显示青塔山英云闪长岩中黑云母投点均落在 $\text{Fe}_2\text{SiO}_4-\text{SiO}_2-\text{Fe}_3\text{O}_4$ 区域，表现出低氧逸度特征。岩体中还存在磁铁矿、石英和榍石，适用于 Wones^[30] 的氧逸度公式，公式为

$$\log f_{\text{O}_2} = -30\,930 / (T + 273) + 14.98 + 0.142 \times (P - 1) / (T + 273) \quad (4)$$

式中： f_{O_2} 为氧逸度。根据前文计算的温度 ($684\sim693\,^{\circ}\text{C}$) 和压力 ($1.86 \times 10^8 \sim 2.01 \times 10^8\,\text{Pa}$)，计算得到氧逸度为 $-17.34\sim-17.04$ 。

4.3 物质来源与岩石成因

黑云母主量元素含量的特征对岩浆源区性质具有一定的指示作用^[31]，青塔山岩体的 $\text{MgO}-\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ 图解 (图 7(c)) 显示青塔山岩体的形成与壳幔混源岩浆有关。Abdel^[32] 通过研究总结了黑云母主量元素与构造环境之间的关系，提出了构造环境判别图解。青塔山岩体的黑云母 $\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解 (图 7(d)) 显示其黑云母的物质

来源为钙碱性造山岩套。一般来说,造岩矿物黑云母的 Nd、Hf 同位素组成是反映岩体物质来源最直接的方法,但造山带中由泥质岩石演化而来的黑云母具有过铝质特征,但同样会表现出造山环境的特征,因此仅通过黑云母 Al - Fe 关系推断构造环境不够严谨^[33]。本文未开展 Nd - Hf 同位素测试,虽然黑云母电子探针结果显示样品具有贫 Ca 的特征,但不能完全排除其泥质来源,还需要进一步的工作确定。

5 结论

(1)通过对青塔山岩体样品的电子探针分析,确定其英云闪长岩中斜长石成分为中长石和拉长石,黑云母属镁质黑云母,角闪石为镁角闪石。

(2)斜长石样品的 An 值先增后减,呈现出反环带、正环带的特点。推断该斜长石环带特征的产生是由于在岩浆结晶过程中后续较热的偏基性岩浆混合了较冷的已结晶出斜长石的偏酸性岩浆。

(3)青塔山英云闪长岩黑云母的结晶温度为 684 ~ 693 ℃。结晶压力为 $(1.86 \sim 2.01) \times 10^8$ Pa,平均值为 1.92×10^8 Pa,对应结晶深度为 6.90 ~ 7.46 km,平均 7.12 km,属于中深成相。氧逸度较低,为 -17.34 ~ -17.04。

(4)黑云母主量元素含量特征指示青塔山英云闪长岩岩体的形成与壳幔混源岩浆有关,推测黑云母的物质来源为钙碱性造山岩套。

致谢:审稿专家对本文提出了宝贵的意见和建议,在此表示由衷感谢!

参考文献 (References):

- [1] 柏道远,贾宝华,孟德保,等.且末县一级电站幅、银石山幅地质调查新成果及主要进展[J].地质通报,2004,23(5):564 - 569.
- Bai D Y, Jia B H, Meng D B, et al. New results and major progress in regional geological survey of the Qiemo County First - Order Power Station and Yinshishan sheets[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(5): 564 - 569.
- [2] 亓鹏.东昆仑西段青塔山岩体岩石学特征及其成因探讨[D].北京:中国地质大学(北京),2019.
- Qi P. Petrological Characteristics and Genesis of the Qingtashan Rock

- Mass in the Western Segment of the East Kunlun Mountains[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [3] 杨运军,张锋军,杨克俭,等.北祁连奥陶纪板内组火山岩特征及构造意义[J].西北地质,2015,48(1):26 - 36.
- Yang Y J, Zhang F J, Yang K J, et al. Characteristics and tectonic significance of the volcanic rock in Ordovician Koumenzi Formation, North Qilian Orogen [J]. Northwestern Geology, 2015, 48(1): 26 - 36.
- [4] 邓晋福,罗照华,苏尚国,等.岩石成因、构造环境与成矿作用[M].北京:地质出版社,2004:12.
- Deng J F, Luo Z H, Su S G, et al. Petrogenesis, Tectonic Environment and Mineralization [M]. Beijing: Geology Press, 2004: 12.
- [5] 李秉新. 矾山杂岩体岩石学特征[J]. 西安工程学院报, 2002, 24(1): 5 - 11.
- Li B X. Characteristics of petrology of Fanshan complex body [J]. Journal of Xi'an Engineering University, 2002, 24(1): 5 - 11.
- [6] Moyen J F, Martin H. Forty years of TTG research [J]. Lithos, 2012, 148: 312 - 336.
- [7] Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An overview of adakite, tonalite - trondhjemite - granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution [J]. Lithos, 2005, 79(1/2): 1 - 24.
- [8] 殷晓,迟广成,陈英丽,等.电子探针波谱分析在长石鉴定中的应用[J].四川地质学报,2016,36(2):350 - 352.
- Yin X, Chi G C, Chen Y L, et al. The application of electron probe spectrum analysis to feldspar identification [J]. Acta Geologica Sichuan, 2016, 36(2): 350 - 352.
- [9] 肖平,刘军.多硅白云母晶体化学式几种方法的讨论——用电子探针数据计算[J].华东地质学院学报,2001,24(1):11 - 14.
- Xiao P, Liu J. Discussion on the methods for calculating the crystal chemical formula of phengite by the date from electron probe [J]. Journal of East China Geological Institute, 2001, 24(1): 11 - 14.
- [10] 林文蔚.岩(矿)石中真实矿物组成的计算及矿物化学成分初步逼近[J].岩石学报,1987,3(2):37 - 51.
- Lin W W. A calculation method of real mineral assemblages and preliminary approximation of mineral chemical compositions of rocks (ores) [J]. Acta Petrologica Sinica, 1987, 3(2): 37 - 51.
- [11] 路远发,李文霞. CIPW 标准矿物计算方法与程序设计 [J]. 华南地质, 2021, 37(3): 348 - 360.
- Lu Y F, Li W X. Calculation method and VBA program of CIPW norm minerals [J]. South China Geology, 2021, 37(3): 348 - 360.
- [12] 路远发,李文霞.花岗岩类自然矿物岩石化学换算及程序设计 [J]. 华南地质, 2021, 37(4): 445 - 457.
- Lu Y F, Li W X. Petrochemical calculation method and VBA program for natural mineral of granitoids [J]. South China Geology, 2021, 37(4): 445 - 457.
- [13] 赛盛勋,赵天明,王中亮,等.玲珑黑云母花岗岩成因:矿物学特征约束[J].岩石学报,2016,32(8):2477 - 2493.
- Sai S X, Zhao T M, Wang Z L, et al. Petrogenesis of Linglong biotite granite: Constraints from mineralogical characteristics [J]. Ac-

- ta Petrologica Sinica, 2016, 32(8): 2477 – 2493.
- [14] 陈克樵, 欧阳菲. 电子探针定量分析直接测定含铁矿物中二价和三价铁[J]. 岩矿测试, 1992, 11(4): 306 – 310.
Chen K Q, Ouyang F. Determination of iron(II) and iron(III) in iron – bearing minerals by electron probe analysis[J]. Rock and Mineral Analysis, 1992, 11(4): 306 – 310.
 - [15] Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, et al. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names [J]. American Mineralogist, 1997, 82 (9/10): 1019 – 1037.
 - [16] 牛之建, 刘跃, 狄永军. 大兴安岭五岔沟地区中生代粗安岩中斜长石环带特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(1): 102 – 108.
Niu Z J, Liu Y, Di Y J. Zoning characteristics of the plagioclase from the Mesozoic trachyandesite in Wuchagou area of the Da Hinggan Mountains and its geological implications[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2014, 33(1): 102 – 108.
 - [17] Singer B S, Dungan M A, Layne G D. Textures and Sr, Ba, Mg, Fe, K and Ti compositional profiles in volcanic plagioclase: clues to the dynamics of calc – alkaline magma chambers[J]. American Mineralogist, 1995, 80(7/8): 776 – 798.
 - [18] 史洪峰, 董长春, 续琰祺. 青海香日德水文站岩体斜长石特征及其地质意义[J]. 西北地质, 2016, 49(1): 109 – 120.
Shi H F, Dong C C, Xu Y Q. Features and geological significance of the plagioclases from the intrusive body in Xiangride hydrological station, Qinghai [J]. Northwestern Geology, 2016, 49(1): 109 – 120.
 - [19] Anderson J L, Smith D R. The effects of temperature and on the Al – in – hornblende barometer[J]. American Mineralogist, 1995, 80(5/6): 549 – 559.
 - [20] 黎敦朋, 肖爱芳, 刘文元. 福建省侏罗纪 – 白垩纪花岗岩角闪石 – 斜长石矿物温压计的地质意义[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2014, 37(4): 351 – 359.
Li D P, Xiao A F, Liu W Y. Implication of amphibole – plagioclase geobarometry of Jurassic – Cretaceous granite, Fujian Province, China[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2014, 37(4): 351 – 359.
 - [21] 贡晓瑞, 陈希节, 蔡志慧, 等. 青海共和盆地东北部干热岩岩浆侵位结晶条件及深部结构初探[J]. 岩石学报, 2020, 36(10): 3171 – 3191.
Yun X R, Chen X J, Cai Z H, et al. Preliminary study on magmatic emplacement and crystallization conditions and deep structure of hot dry rock in the northeastern Gonghe basin, Qinghai Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(10): 3171 – 3191.
 - [22] 吕志成, 段国正, 董广华. 大兴安岭中南段燕山期三类不同成矿花岗岩中黑云母的化学成分特征及其成岩成矿意义[J]. 矿物学报, 2003, 23(2): 177 – 184.
Lü Z C, Duan G Z, Dong G H. Mineral chemistry of biotite from granites associated with different mineralization in three stages of Yanshanina period in the southern – middle parts of the Da Hinggan Mountains and its petrogenetic and metallogenic significance[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2003, 23(2): 177 – 184.
 - [23] 王崴平, 唐菊兴, 应立娟. 西藏甲玛铜多金属矿床角闪岩中黑云母矿物化学特征及地质意义[J]. 地球学报, 2012, 33(4): 444 – 458.
Wang W P, Tang J X, Ying L J. Mineral chemical characteristics of biotites from hornfels in the Jiamay (Gyama) polymetallic copper deposit of Tibet and their geological significance[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2012, 33(4): 444 – 458.
 - [24] 雷敏, 吴才来, 秦海鹏, 等. 安徽铜陵地区虎山岩体矿物成分特征及其锆石 U – Pb 年代学[J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1274 – 1292.
Lei M, Wu C L, Qin H P, et al. Mineral composition and zircon U – Pb dating of the Hushan intrusion in Tongling area, Anhui Province[J]. Geology in China, 2015, 42(5): 1274 – 1292.
 - [25] Uchida E, Endo S, Makino M. Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits[J]. Resource Geology, 2007, 57(1): 47 – 56.
 - [26] 桑隆康, 马昌前. 岩石学[M]. 2 版. 北京: 地质出版社, 2012.
Sang L K, Ma C Q. Petrology [M]. 2nd ed. Beijing: Geology Press, 2012.
 - [27] 刘行, 邹颢, 李阳, 等. 川西新元古代灯杆坪花岗岩成因与岩浆演化: 来自斜长石和黑云母矿物学依据[J]. 现代地质, 2020, 34(5): 1043 – 1057.
Liu H, Zou H, Li Y, et al. Origin and magmatic evolution of the neoproterozoic Dengganping Granite in Western Sichuan: mineralogical evidence from plagioclase and biotite [J]. Geoscience, 2020, 34(5): 1043 – 1057.
 - [28] Henry D J, Guidotti C V, Thomson J A. The Ti – saturation surface for low – to – medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti – substitution mechanisms[J]. American Mineralogist, 2005, 90(2 – 3): 316 – 328.
 - [29] David R W, Hans P E. Stability of biotite: Experiment, theory, and application[J]. American Mineralogist, 1965, 50(9): 1228 – 1272.
 - [30] Wones D R. Significance of the assemblage titanite + magnetite + quartz in granitic rocks[J]. American Mineralogist, 1989, 74(7 – 8): 744 – 749.
 - [31] 周作侠. 侵入岩的镁铁云母化学成分特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 1988(3): 63 – 73.
Zhou Z X. Chemical characteristics of Mafic Mica in Intrusive Rocks and its geological meaning [J]. Acta Petrologica Sinica, 1988(3): 63 – 73.
 - [32] Abdel – Rahman A F M. Nature of biotites from alkaline, calc – alkaline, and peraluminous magmas [J]. Journal of Petrology, 1994, 35(2): 525 – 541.
 - [33] Kumar S, Pathak M. Mineralogy and geochemistry of biotites from Proterozoic granitoids of western Arunachal Himalaya: evidence of bimodal granitogeny and tectonic affinity[J]. Journal of the Geological Society of India, 2010, 75(5): 715 – 730.

Geochemical characteristics and geological significance of Qingtashan rock mass in Qiemo County of Xinjiang

LI Shaowen^{1,2}, ZHOU Chuanfang^{1,2}, YANG Huaben^{1,2}, WANG Jiuyi^{1,2}, LIANG Zhongkai^{1,2}

(1. Harbin Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological Survey, Heilongjiang Harbin, 150086, China;

2. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil of Harbin, Ministry of Natural Resources, Heilongjiang Harbin, 150086, China)

Abstract: Qingtashan rock mass is located in the western section of East Kunlun, and the formation age, environment and rock type of the rock mass are still controversial, with low research degree of the physicochemical conditions during the process of rock formation and its source characteristics. On the basis of systematic lithology and petrographic research, the authors in this paper conducted composition analysis on the main rock – forming minerals such as biotites, plagioclases and hornblendes. The physicochemical conditions during the process of rock formation were identified and petrogenesis of the rock was further constrained. This study shows that the lithology of Qingtashan rock mass is tonalites, and the lithology of the dike is quartz – diorites. The Plagioclase feldspar in the rock mass is andesine and labradorite, the biotite is magnesiobiotite, and the hornblende is magnesiohornblende. An anti – zoning band was developed in the plagioclase, which was caused by magma mixing. The crystallization temperature is 684 ~ 693 °C and the crystallization pressure is $(1.86 \sim 2.01) \times 10^8$ Pa, with average value of 1.92×10^8 Pa. The corresponding crystallization depth is 6.90 ~ 7.46 km, with an average of 7.12 km, belonging to the medium – deep formation phase. The oxygen fugitivity during rock mass formation is low, which is between -17.34 and -17.04. The mineral chemical characteristics show that the material source of the biotite in Qingtashan rock mass is calc – alkaline orogenic suite, and its formation is related to the crust – mantle mixed source magmatic. This study could provide references for the evolution of Late Triassic – Early Jurassic magma in this region.

Keywords: tonalite; electron microprobe; plagioclase zone; geothermobarometer; Kunlun Mountains

(责任编辑: 魏昊明)