

塔什库尔干新生代碱性杂岩造岩矿物 化学成分及成因意义

柯珊^{1,2}, 罗照华^{1,2}, 莫宣学^{1,2}

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要 新疆塔什库尔干碱性杂岩体主要由苦子干碱性正长岩体和卡日巴生碱性花岗岩体组成, 是帕米尔地区最大的新生代碱性杂岩体。本文在岩相学和矿物化学的基础上, 着重研究了苦子干岩体主要造岩矿物的种属、共生关系和结晶顺序。研究表明, 苦子干岩体中的不同岩石类型系同源岩浆演化的产物, 岩浆在整个演化过程中平衡结晶作用占主导, 分离结晶作用的影响极小。据岩浆房中矿物结晶时的温度和压力条件、矿物的结晶特征及演化趋势, 推测岩浆上升速度较快, 侵位较浅。

关键词: 塔什库尔干, 苦子干, 碱性杂岩, 正长岩, 花岗岩, 矿物学

中图分类号: P588.15; P574.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2006)02-0148-09

Mineralogy of Taxkorgan Cenozoic alkaline complex in Xinjiang and its implication to pluton genesis

KE Shan^{1,2}, LUO Zhao-hua^{1,2} and MO Xuan-xue^{1,2}

(1. State key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Department of Geosciences and Land Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Taxkorgan complex, mainly composed of alkaline syenites and subalkaline granitoids, is the largest Cenozoic alkaline complex in Pamirs region. Based on geography and geochemistry of the rock-forming minerals in Kuzigan intrusion, this paper discusses the classification, intergrowth, and crystalline sequence of minerals. The mineralogical characteristics suggest that different rock types of Kuzigan intrusion are products of the same magma, and that the magma, instead of being affected much by fractional crystallization, has dominantly experienced equilibrating crystallization. According to temperature, pressure, and chemical evolution of mineral crystallization in the magma chamber, it is held that the magma of intrusive rocks ascended rather fast and was emplaced at the relatively shallow place.

Key words: Taxkorgan; Kuzigan; alkaline complex; syenite; granitoids; mineralogy

帕米尔构造结是青藏高原构造挤压最强烈、地壳短缩量最大的地区之一。新疆塔什库尔干碱性杂岩位于帕米尔构造结的中东部, 是区内新生代最大的碱性杂岩体, 也是喀喇昆仑地区喜马拉雅期一个重要的花岗质岩体(丁道桂等, 1996; 姜耀辉等,

2000; 潘裕生等, 2000)。由于该岩体处于特殊而关键的位置, 近年来受到越来越多青藏高原研究者的关注, 并与其他地区的类似岩石联系起来探讨区域地质演化。例如, 张玉泉等(1994, 1997)认为塔什库尔干碱性杂岩是3 700 km长的哀牢山-金沙江新生

代碱性钾质岩浆岩带的终点;王中刚等(2002)把盖孜-塔什库尔干富碱侵入岩带作为昆仑山-阿尔金山地区3条富碱侵入岩带之一,认为是我国最年轻的富碱侵入岩带。然而,前人工作主要集中在岩体的总体地质特征、岩石地球化学及其构造意义等方面,缺乏系统的矿物学研究,因而未能获取矿物中所蕴含的关于岩浆成因及地球动力学方面的信息,使得这种区域对比显得证据不够充分。本文主要研究塔什库尔干碱性杂岩主要造岩矿物的矿物学特征,以为杂岩体的成因及形成条件提供矿物学约束。

1 地质背景及岩体地质

沿喀喇昆仑断裂带分布有一条新生代碱性-偏碱性岩带,主要有苦子干、赞坎、苏巴什、卡英迪等碱性杂岩体和卡日巴生花岗岩体,位于塔什库尔干县城西侧的苦子干杂岩体是其中出露面积最大的碱性杂岩体,约200 km²,呈近南北向展布,分布在喀喇昆仑断裂带的次级断裂带塔什库尔干断裂中。岩体主要由正长岩类组成,平面上呈长椭圆形,南北长约20余 km,东西宽约9 km,其同位素年龄为英辉正长岩18.05 Ma(长石, K-Ar, 新疆地质矿产局二大队, 1985)碱性花岗岩33.6±0.7 Ma(全岩, K-Ar, 新疆地质矿产局二大队, 1985)透辉石正长岩54 Ma(Ar-Ar, 潘裕生等, 2000)透辉石花岗岩18 Ma(Ar-Ar, 潘裕生等, 2000)碱性正长岩23 Ma(钾长石, Ar-Ar, 罗照华等, 2003)花岗岩13 Ma(钾长石, Ar-Ar, 罗照华等, 2003),为新生代的杂岩体。辛滚沟河从西向东横切该岩体,造就了一个出露良好的岩体地质剖面(辛滚沟剖面,从斯如依迭尔沟口开始直到辛滚沟河口)。其北侧是出露规模更大的卡日巴生黑云母二长花岗岩体,二者合称为塔什库尔干杂岩体。但因所分析的样品均取自苦子干岩体,所以本文的讨论重点是苦子干岩体。

苦子干杂岩体主要由正长岩类和花岗岩类两部分组成(图1),其中正长岩类可分为暗色正长岩系列和浅色正长岩系列,岩石类型以霓辉正长岩为主,霓辉石石英正长岩次之;花岗岩可分为正长花岗岩和黑云母二长花岗岩两个系列。根据野外观察,暗色正长岩形成时间早于浅色正长岩类,有相当体积的暗色正长岩呈大小不等的团块状被包裹于浅色正长岩中,有些部位还可见浅色正长岩细脉穿插于暗色正长岩中。正长花岗岩位于岩体的核部,与浅色

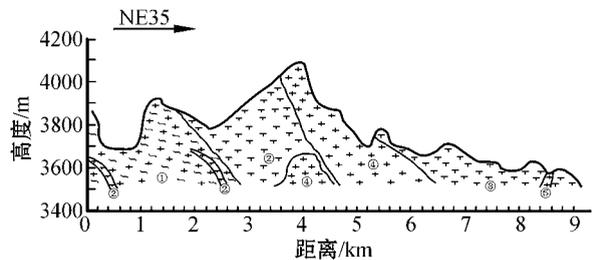


图1 塔什库尔干碱性杂岩体辛滚沟实测剖面图

Fig.1 The Xingungou section of Taxkorgan complex

- ①—片麻状花岗岩;②—暗色正长岩岩脉;③—浅色正长岩类(含暗色正长岩类的团块);④—正长花岗岩(含暗色正长岩类的团块);⑤—黑云母二长花岗岩岩枝
- ①—gneissic granite;②—veins of melanic syenite;③—light colored syenitoids (bear blocks of melanic syenitoids);④—syenitoids (bear blocks of melanic syenitoids);⑤—offshoot of biotite monzonitic granites

正长岩无明显的界限,呈逐渐过渡的接触关系,亦包裹有暗色正长岩团块。黑云母二长花岗岩(卡日巴生岩体)则在边部呈岩枝侵入到浅色正长岩中。

根据前人资料(谢应雯等,1998;潘裕生等,2000),正长岩类 SiO₂ 含量为50%~64%,范围较宽, K₂O、Na₂O 含量高,从9.3%~13.4%, K₂O > Na₂O,一般 K₂O 是 Na₂O 的2~7倍;花岗岩类 SiO₂ 含量为70%~71%,正长花岗岩与黑云母二长花岗岩 K₂O、Na₂O 含量分别为9.6%~10.2%和8.6%~9.4%, K₂O 均大于 Na₂O, K₂O 分别是 Na₂O 的1.5倍和1.3倍。在莱特碱度率(AR)对 SiO₂ 图上都处在碱质区,同属于碱质岩石。岩体中亲石元素 Ba、Sr、Rb、Th、Zr、Hf 和 LREE 明显较高, Sr、Ba 尤其突出,是西昆仑-喀喇昆仑地区含量最高的岩体。以上总体特征表明塔什库尔干碱性杂岩体是一种富钾的碱性花岗岩类。

2 矿物学及矿物化学特征

正长岩类是辛滚沟剖面的主体岩石,碱性正长岩主要为中粒、中细粒、粗粒结构和块状构造,部分岩石具似斑状结构,晶洞构造亦较为普遍。岩体边部矿物结晶较为粗大,向中心渐小。暗色正长岩和浅色正长岩的矿物种类与结构构造相似,但暗色矿物的含量不同。岩石的主要矿物组成为石英(~5%)、钾长石(50%~65%)、斜长石(~10%)、透辉石和霓辉石(10%~25%)、角闪石(~5%)、黑云母

(~5%) ,尚含少量方解石、烧绿石、钙钛矿、磷灰石、榍石、磁铁矿。花岗岩主要为透辉石-霓辉石正长花岗岩和黑云母二长花岗岩。正长花岗岩的主要矿物种类与正长岩相同,只是前者石英和斜长石明显增多,而透辉石和霓辉石明显减少,暗示它们可能存在某种成因联系。黑云母二长花岗岩具中细粒结构、块状构造,其暗色矿物以黑云母为主,含有少量的角闪石,不含透辉石和霓辉石。除样品 018A、018B2、018H1 和 019C 的电子探针分析在中国地质科学院完成外,其他样品的分析均在中国科学院地质与地球物理研究所完成。

2.1 长石

正长岩类和正长花岗岩中的长石均以钾长石为主,只有少量的斜长石出现。岩石中钾长石可以呈斑晶或基质出现,因表面风化而呈肉红色和灰黑色,

大小从 0.5 mm 到 2 cm 不等,可见卡氏双晶。薄片 中钾长石呈自形、半自形板状、柱状,普遍高岭石化,正长岩中钾长石高岭石化较花岗岩中的强烈。常见钾长石包裹了透辉石、榍石和磷灰石。碱性长石成分变化范围较大,但主要属于富 Or 的变种,为钾长石和条纹长石。条纹长石中的钠长石客晶约占整个晶体的 15%~20%,其形态特征和客晶含量说明条纹长石是钾长石在低温状态下出溶的结果。根据碱性长石的电子探针分析结果(表 1),可以将其分为富钾和富钠两种类型。在长石分类图解中,富钠的变种投点落在钠长石区(图 2),而富钾变种则有一个比较宽的变化范围。结合岩相学观察,这主要是因为钾长石存在两种结构类型,一种是结构均一的钾长石,一种是具有分解条纹的条纹长石。样品 zb29-4、018B、018H1 和 018A 的探针点分别打在了条纹长石

表 1 长石分析结果($w_B/\%$)及主要参数表

Table 1 Chemical composition ($w_B/\%$) and main parameters of representative feldspars

岩石类型	霓辉石正长岩														
	zb02-f		zb16-11		zb28-1	zb28-15			zb29-6	018B2		018H1			
长石类型	钾长石	斜长石	钾长石	斜长石	钾长石	钾长石			钾长石	条纹长石		条纹长石			
SiO ₂	63.79	62.00	62.06	61.71	63.73	63.09	64.40	61.47	64.96	65.51	66.16	68.46	64.83	68.21	64.64
TiO ₂	0.08	0.00	0.00	0.12	0.06	0.05	0.08	0.16	0.02	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03
Al ₂ O ₃	19.52	23.45	23.79	19.04	22.61	19.05	18.83	19.37	18.38	18.50	18.40	19.42	17.34	19.03	17.25
FeO	0.16	0.70	0.09	0.26	0.12	0.26	0.50	0.35	0.62	0.35	0.00	0.28	0.21	0.27	0.30
MnO	0.00	0.17	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
MgO	0.02	0.05	0.05	0.00	0.03	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.02	0.00
CaO	0.14	4.44	4.74	0.04	4.24	0.00	0.00	0.00	0.01	1.00	0.13	0.11	0.01	0.10	0.02
Na ₂ O	4.13	8.94	8.77	3.26	9.62	1.55	1.81	1.60	0.96	2.24	2.57	10.70	0.62	10.56	1.04
K ₂ O	9.40	0.30	0.17	10.45	0.25	14.01	13.87	12.88	15.22	13.26	13.34	0.25	17.04	0.89	16.1
An	0.74	21.17	22.77	0.22	19.32	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.63	0.56	0.03	0.51	0.08
Ab	39.74	77.13	76.25	32.09	79.32	14.39	16.55	15.88	8.74	20.43	22.51	97.91	5.20	94.28	8.96
Or	59.51	1.70	0.97	67.69	1.36	85.61	83.45	84.12	91.21	79.57	76.86	1.52	94.77	5.21	90.97

岩石类型	霓辉石石英正长岩					透辉石正长花岗岩							
	zb02-2		018A		zb16-13	zb16-13	zb18-8		zb29-1	zb29-4	zb29-4		
长石类型	钾长石	条纹长石		钾长石	斜长石	钾长石	斜长石	钾长石	斜长石	条纹长石			
SiO ₂	64.90	66.56	68.90	64.86	66.24	62.78	62.63	62.55	62.27	64.95	64.50	64.42	68.24
TiO ₂	0.03	0.01	0.02	0.00	0.01	0.02	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	18.27	18.59	18.54	17.06	18.69	24.21	24.31	18.19	23.44	17.89	21.80	17.92	19.10
FeO	0.43	0.40	0.86	0.24	0.13	0.22	0.07	0.13	0.21	0.12	0.28	0.41	0.23
MnO	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
MgO	0.00	0.01	0.01	0.00	0.06	0.00	0.05	0.03	0.00	0.04	0.07	0.00	0.00
CaO	0.00	0.06	0.01	0.03	0.06	4.32	4.85	0.01	4.84	0.00	3.68	0.00	0.09
Na ₂ O	3.00	2.14	10.56	1.24	2.35	8.89	8.93	1.02	8.63	1.42	9.48	1.05	11.83
K ₂ O	12.37	12.33	0.23	16.19	12.96	0.32	0.19	14.88	0.37	14.63	0.55	15.16	0.25
An	0.00	0.32	0.03	0.13	0.30	20.78	22.84	0.05	23.16	0.00	17.12	0.00	0.41
Ab	26.93	20.81	98.55	10.40	21.54	77.39	76.10	9.43	74.73	12.86	79.83	9.52	98.22
Or	73.07	78.87	1.42	89.48	78.16	1.83	1.07	90.52	2.11	87.14	3.05	90.48	1.37

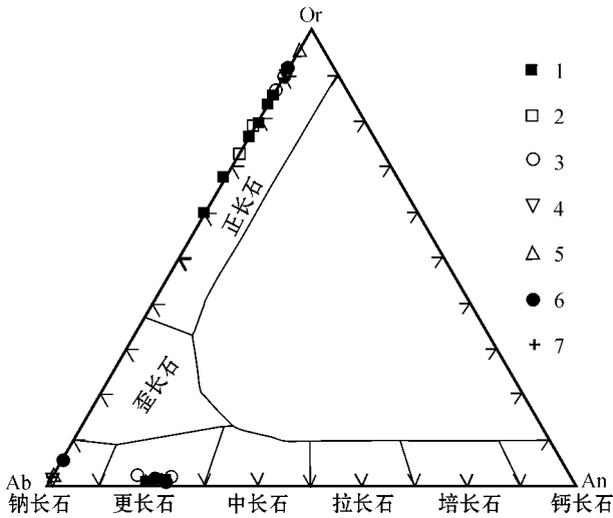


图 2 长石 An - Ab - Or 分类图解

Fig. 2 Feldspar composition in An - Ab - Or diagram

- 1—霓辉石英正长岩 ; 2—霓辉石正长岩 ; 3—透辉石正长花岗岩 ;
- 4—透辉石正长花岗岩中的条纹长石 ; 5、6—霓辉石正长岩中的条纹长石 ; 7—霓辉石英正长岩中的条纹长石

- 1—aegirine-augite quartz syenite ; 2—aegirine-augite syenite ;
- 3—diopside syenogranite ; 4—perthite in diopside syenogranite ;
- 5、6—perthite in aeigirine-augite syenite ; 7—perthite in aeigirine-augite quartz syenite

的主、客晶上,可以看出在条纹长石中,主晶比均一的正长石更富钾而客晶(分解条纹)比正长石更富钠,表明固相线下的变化对钾长石成分有重要影响。无论是正长岩类还是正长花岗岩,二者的条纹长石分解程度相近,均较为彻底,钠长石客晶和钾长石主晶几乎接近钾钠长石固溶体的两个端员。

斜长石颗粒较钾长石小得多,仅有 0.1~0.2 mm,大都具有细密平直的聚片双晶。显微镜下常见斜长石交代钾长石,形成蠕虫结构。薄片斜长石

表面较为清澈,基本未遭受后期蚀变。根据电子探针分析结果(表 1,图 2),塔子干各岩石类型的斜长石均为更长石($An \approx 20$)。两种长石的形状、大小及交代关系,说明钾长石先于斜长石而结晶,在 $Qz - Ab - Or$ 三元相图中,岩浆的成分应该位于钾长石的首晶区。

据条纹长石的主、客晶的比例与成分(表 1),利用碱性长石 $Ab - Or$ 二元相图可以推算出钾长石分解为条纹长石前的成分约为 $Ab_{20}Or_{80}$ 。根据碱性长石的实验相图可知,在岩浆的演化过程中,钾长石基本处在平衡结晶的状态,结晶分离作用不占主导。因为根据 $Ab - Or$ 系相平衡原理(图略),如若钾长石发生了分离结晶作用,则不论岩浆原始的成分如何,最终的熔体成分都将到达 M 点或接近 M 点,结晶出的是富钠长石的碱性长石。显然这种过程是不可能结晶出成分约为 $Ab_{20}Or_{80}$ 的钾长石,也更不可能分解成钾长石多于钠长石的正条纹长石。

2.2 透辉石和霓辉石

透辉石在薄片呈粒状和棒状,浅绿色,具弱多色性。霓辉石呈长柱状,多色性明显,常具环带结构,核部近于无色透明,而边部呈深绿色。辉石具有富钙富铁的特点(表 2,图 3),在图 3 中投点主要落在次透辉石区和铁次透辉石区。具环带的霓辉石,从中心至边缘,电子探针分析显示主元素 Mg、Ca、Al 和 Ti 逐渐降低,TFe、Mn 与 Na 增加,辉石向富铁、富钠方向演化,表明辉石具有正常的环带,与岩浆的演化趋势相符。这与镜下观察结果相一致,即单斜辉石的核部为透辉石或次透辉石,边部霓石分子含量增高,形成霓辉石。由于单个矿物中从核部到边部 Ca 与 Fe^{3+} 变化范围很小,一般不超过 0.2(图 4),

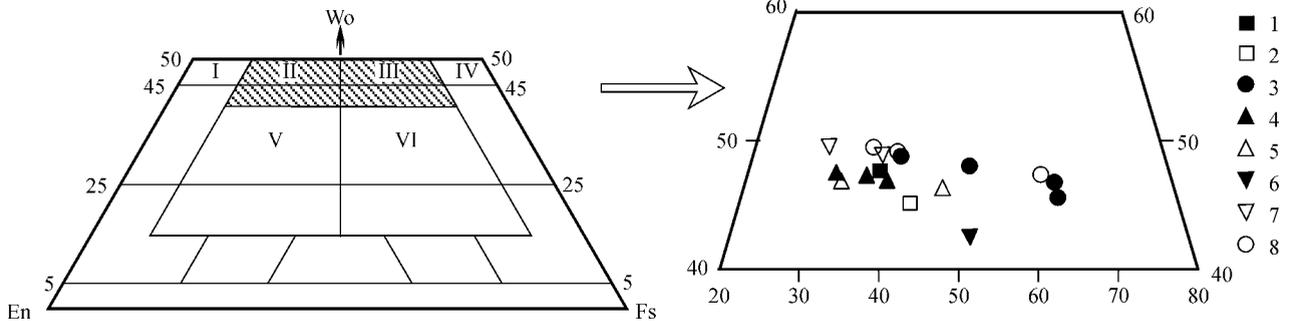


图 3 辉石分类图(转引自 Valderez, 1993)

Fig. 3 Diagram of pyroxene classification(after Valderez, 1993)

- 样品序号及名称同表 2 ; I—透辉石 ; II—次透辉石 ; III—铁次透辉石 ; IV—钙铁辉石 ; V—普通辉石 ; VI—铁普通辉石

For the sequence and names of samples, see table 2 ; I—diopside ; II—salite ; III—ferrosalite ; IV—hedenbergite ; V—augite ; VI—ferroaugite

表 2 辉石分析结果($w_B/\%$)及主要参数表Table 2 The chemical composition($w_B/\%$) and main parameters of pyroxenes

序号	1		3				4			5		6		7		8		
样号	zb02-2	zb02-f	zb16-11				zb28-1			zb28-15		zb29-4		zb29-6		019C		
位置			核心	中部	边部	边部	中部	核心	边部							核心	中部	边部
SiO ₂	51.14	49.60	50.54	49.66	50.14	49.32	53.27	53.51	52.52	53.76	52.39	51.93	51.47	52.09	52.94	52.49	50.55	
TiO ₂	0.47	0.35	0.39	0.11	0.02	0.08	0.10	0.29	0.14	0.14	0.03	0.09	0.11	0.27	0.22	0.21	0.09	
Al ₂ O ₃	1.39	2.96	1.30	0.95	0.40	0.43	0.70	0.87	0.84	0.81	0.20	0.70	2.06	2.25	0.84	1.04	0.63	
FeO ^T	10.30	12.58	11.47	16.03	20.95	21.63	8.93	6.98	10.57	7.46	14.28	16.67	10.06	5.88	8.99	10.46	20.19	
MnO	0.30	0.36	0.32	0.58	0.75	0.81	0.46	0.13	0.40	0.22	0.37	0.42	0.38	0.27	0.24	0.32	0.62	
MgO	12.06	10.86	10.99	7.84	4.34	4.34	12.68	14.30	11.88	14.22	9.09	8.21	11.87	14.19	11.95	11.15	4.80	
CaO	22.76	20.82	23.40	21.99	19.97	19.39	22.68	23.30	22.32	22.77	20.84	18.22	23.65	24.26	23.36	23.15	20.66	
Na ₂ O	0.96	1.19	0.67	1.14	2.05	2.17	1.32	0.58	1.41	0.81	1.87	3.17	0.54	0.64	0.60	0.68	1.71	
K ₂ O	0.00	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	
Cr ₂ O ₃	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.05	0.00	0.08	0.06	0.00	0.02	0.00	0.03	0.03	0.00	
NiO	0.08	0.03	0.00	0.02	0.00	0.02	0.06	0.00	0.00	0.02	0.08	0.09	0.00	0.00				
总量	99.46	99.10	99.08	98.32	98.62	98.19	100.28	100.01	100.08	100.3	99.24	99.53	100.16	99.85	99.17	99.54	99.27	
Si	1.95	1.91	1.94	1.97	2.02	2.00	1.99	1.98	1.98	1.99	2.03	2.02	1.94	1.94	2.00	1.99	2.01	
Al ^(IV)	0.05	0.09	0.06	0.03	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.06	0.06	0.00	0.01	0.00	
Al ^(VI)	0.01	0.05	0.00	0.01	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	
Fe ^(III)	0.13	0.18	0.12	0.15	0.15	0.20	0.11	0.03	0.14	0.05	0.12	0.24	0.09	0.09	0.00	0.02	0.11	
Cr	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	0.00	0.00	
Ti	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	
Fe ^(II)	0.19	0.22	0.25	0.38	0.54	0.52	0.17	0.19	0.19	0.18	0.34	0.29	0.23	0.09	0.28	0.31	0.56	
Mn	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	
Mg	0.68	0.62	0.63	0.46	0.26	0.26	0.71	0.79	0.67	0.78	0.52	0.48	0.67	0.79	0.67	0.63	0.29	
Ca	0.93	0.86	0.96	0.93	0.86	0.84	0.91	0.93	0.90	0.90	0.86	0.76	0.96	0.97	0.95	0.94	0.88	
Na	0.07	0.09	0.05	0.09	0.16	0.17	0.10	0.04	0.10	0.06	0.14	0.24	0.04	0.05	0.04	0.05	0.13	
K	0.00	0.01	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	
Sum	4.04	4.05	4.04	4.04	4.04	4.06	4.03	4.01	4.04	4.02	4.03	4.07	4.03	4.03	4.00	4.01	4.03	
Wo	46.01	43.34	47.73	46.03	42.99	41.61	45.37	46.80	44.75	45.54	43.23	37.60	48.03	48.59	48.39	47.93	44.40	
En	33.92	31.46	31.20	22.83	13.00	12.96	35.30	39.97	33.15	39.58	26.24	23.58	33.55	39.55	34.44	32.12	14.36	
Fs	16.55	20.72	18.60	26.82	36.03	37.00	14.55	11.12	16.99	11.95	23.50	26.99	16.44	9.55	14.94	17.41	34.60	
Ac	3.51	4.48	2.47	4.32	7.99	8.43	4.78	2.11	5.12	2.93	7.02	11.84	1.98	2.32	2.24	2.54	6.64	

注: 1—含霓辉石正长岩; 2、3—霓辉正长岩(暗色矿物局部富集); 4、5、8—霓辉正长岩; 6—含透辉石正长花岗岩; 7—含黑云母霓辉正长岩, 以 6 个阳离子为基础计算。

说明岩浆分离结晶程度相当小(Valderez *et al.*, 1993)。在辉石的 Ac-Di-Hd 三端员变异图解中, 苦子干碱性杂岩中辉石的演化趋势类似于秦巴碱性岩中富钙辉石的演化趋势, 反映出岩浆演化时成分变异不是十分明显(邱家骧等, 1993)。

苦子干岩体中几乎所有的辉石都投在了 Ca 质的范围内, 少部分向钠钙质过渡(图 5), 与谢应雯等(1998)研究青藏高原东部及邻区钾质碱性侵入岩的辉石特征相一致。通常的碱性-过碱性花岗岩类中的碱性辉石多数为钠质(Barbarin, 1999), 而该岩体却几乎全为钙质碱性辉石。岩浆化学成分决定矿物成分, 所以辉石的特征可以反映出岩浆的特点。Nockolds(1954)的碱性正长岩和正长岩 CaO、Na₂O、K₂O 的平均含量分别为 1.98%、8.86%、5.35% 和

4.06%、3.92%、6.53%, 而苦子干岩体中这 3 种氧化物的平均值为 6.07%、3.09%、7.98%[据丁道桂等(1996)姜耀辉等(2000)潘裕生等(2000)的数据整理]。二者相比, 苦子干的 CaO 含量不仅远远大于碱性正长岩, 而且比正长岩还要高, Na₂O 的含量却相反, 所以苦子干正长岩岩浆更富 CaO 和 K₂O, 而贫 Na₂O。

2.3 角闪石

无论是在正长岩系列中或是在花岗岩系列中角闪石的含量都比较少, 仅占 5% 左右。薄片角闪石为蓝绿色, 多色性和吸收性较普通角闪石弱。角闪石为绿色变种, 按 Leake(Leake *et al.*, 1997; 王立本, 2001)新的分类方案, 属于钙质闪石亚族(图 6 表 3), 主要为浅闪石和镁绿钙闪石。角闪石可以直接

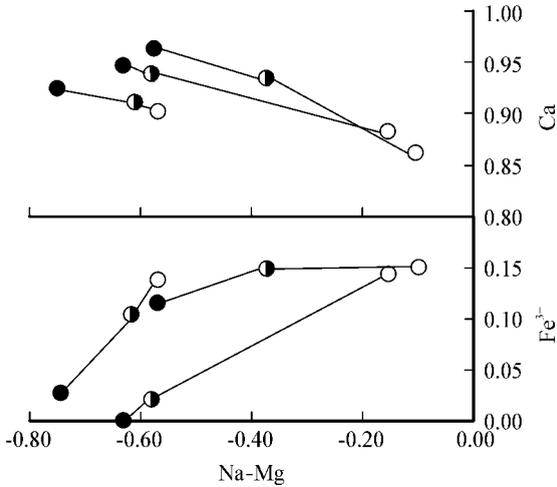


图 4 辉石 Na-Mg 对 Ca 与 Na-Mg 对 Fe³⁺ 图解

Fig. 4 Na-Mg versus Ca and Na-Mg versus Fe³⁺

for pyroxenes

实心—核部 半实心—中部 空心—边部

solid—core ; half solid—medium ; hollow—rim

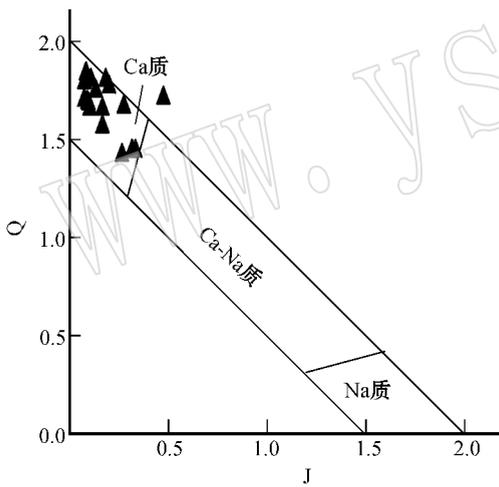


图 5 辉石 Q-J 分类图 (Morimoto, 1988)

Fig. 5 Pyroxene classification in Q-J diagram

从岩浆中晶出,也可以由单斜辉石与岩浆反应而成,部分透辉石-霓辉石具有角闪石反应边就是很好的证明。根据 Hammarstrom 和 Zerk (1986) 所提出的角闪石全铝含量与压力的关系式: $\mu(\text{kbar}) = -3.92 + 5.03\text{Al}^{\text{T}}$ ($r^2 = 0.80$ ($\text{Al}^{\text{T}} = \text{Al}^{\text{IV}} + \text{Al}^{\text{VI}}$)), 计算出苦子干碱性杂岩中角闪石结晶时压力变化范围为 0.077~0.687 GPa。根据该岩体所处的构造环境,以 1 GPa \approx 30 km 的造山带压力梯度估算,深度变化范围为 2.3~21 km。角闪石形成的温度则采用 Holland 和 Bandy (1994) 的角闪石-斜长石温度计估算出为 700

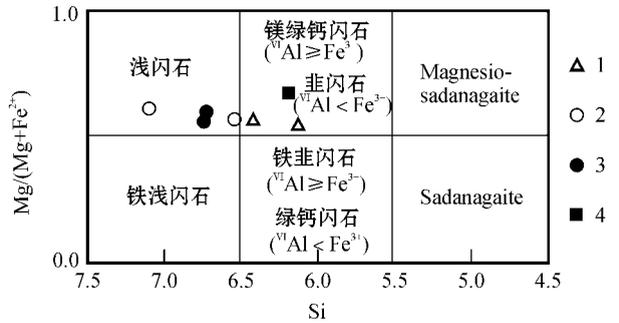


图 6 钙质角闪石分类 (Leake et al., 1997; 王立本, 2001)

Fig. 6 Classification of calcic amphibole (from Leake et al., 1997; Wang Liben, 2001)

1—霓辉正长岩 (暗色矿物局部富集) 2—正长花岗岩 (暗色矿物局部富集) 3—含透辉石和霓辉石正长花岗岩 4—含黑云母霓辉正长岩
1—augirine syenite; 2—syenitoids; 3—augite and augirine bearing syenitoid; 4—biotite bearing augirine syenite

表 3 角闪石分析结果 (w_B%) 及主要参数表

Table 3 Chemical composition (w_B%) and main parameters of amphiboles

样品	1	2	3	4	5		
样号	zb16-11	zb18-8	zb29-1	zb29-6	zb02-f		
SiO ₂	41.60	42.47	47.93	44.56	44.58	41.23	39.76
TiO ₂	0.73	0.45	0.32	0.50	0.54	0.31	0.65
Al ₂ O ₃	9.18	7.84	5.34	7.37	7.29	12.13	11.18
FeO	18.31	19.28	17.14	18.19	18.65	14.79	19.76
MnO	0.39	0.61	0.72	0.61	0.69	0.63	0.25
MgO	10.54	10.50	12.31	11.26	10.83	12.07	9.55
CaO	11.10	11.66	11.71	11.25	11.44	11.80	11.53
Na ₂ O	2.76	1.98	1.68	2.29	2.25	2.35	2.40
K ₂ O	1.77	1.44	0.98	1.44	1.40	2.05	1.91
Cr ₂ O ₃	0.02	0.04	0.01	0.00	0.03	0.02	0.11
NiO	0.00	0.07	0.00	0.00	0.04	0.00	0.02
Total	96.40	96.34	98.14	97.47	97.74	97.38	97.12
Si	6.41	6.54	7.10	6.73	6.74	6.18	6.12
Al ^(IV)	1.59	1.42	0.90	1.27	1.26	1.82	1.88
T	8.00	7.97	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Al ^(VI)	0.08	0.00	0.03	0.04	0.04	0.33	0.15
Ti	0.08	0.05	0.04	0.06	0.06	0.03	0.08
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Fe ⁽ⁱⁱⁱ⁾	0.50	0.66	0.41	0.54	0.45	0.55	0.68
Fe ⁽ⁱⁱ⁾	1.86	1.83	1.71	1.76	1.91	1.31	1.86
Mn	0.05	0.08	0.09	0.08	0.09	0.08	0.03
Mg	2.42	2.41	2.72	2.53	2.44	2.70	2.19
C	5.00	5.03	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Ca	1.83	1.92	1.86	1.82	1.85	1.90	1.90
Na	0.17	0.08	0.14	0.18	0.15	0.10	0.10
B	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Na	0.66	0.52	0.34	0.49	0.51	0.58	0.62
K	0.35	0.28	0.19	0.28	0.27	0.39	0.37
A	1.01	0.80	0.53	0.77	0.78	0.97	0.99
压力/GPa	4.47	3.24	0.77	2.67	2.62	6.87	6.28
温度/℃	817		703	737	732		811

注: 1、5—霓辉正长岩 (暗色矿物局部富集); 2—正长花岗岩 (暗色矿物局部富集); 3—含透辉石-霓辉石正长花岗岩; 4—含黑云母霓辉正长岩; 两个样品无温度计算结果是因为无相应的斜长石成分; 以 23 个阳离子为基础计算。

~820°C。据角闪石全铝压力计的计算结果,角闪石结晶时的压力及所对应的深度分别集中在~20 km、~12 km 和~2 km 3 个阶段,而角闪石的结晶温度却保持在 700~820°C 之间。从 20 km 到 2 km 岩浆近等温上升,说明岩浆上升速度快,侵位浅。这与野外所观察到正长岩类所具的层状节理和普遍发育的晶洞构造相吻合。但据部分岩石具中粒、粗粒结构和块状构造推测,岩体不可能达到 2 km 这么浅,岩体侵位的深度应该大于 2 km,在 12 km 到 2 km 之间。

2.4 黑云母

黑云母在正长岩和正长花岗岩中的含量较少,只在岩体的边部有少量出现,或在暗色矿物局部集中时与透辉石、霓辉石、角闪石共同组成暗色团块。黑云母的探针分析结果见表 4。根据 Milan Rieder 等(李胜荣摘译,2001)和程启芬等(1987)有关黑云母的成分分类标准,该岩体的黑云母一般为褐色变种,大部分属富镁黑云母,少部分向金云母区过渡。在 Mg-Al-Fe²⁺ 图解(图 7)中,与世界典型碱性岩

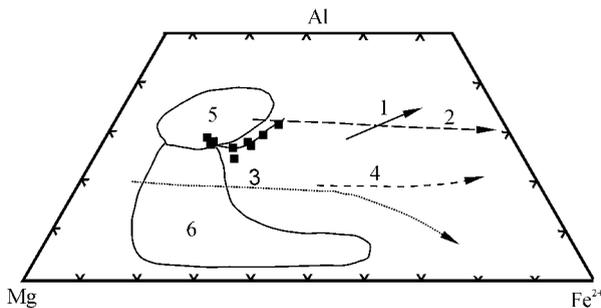


图 7 黑云母 Al-Mg-Fe²⁺ 图解

Fig. 7 Biotite composition plotted in the Al-Mg-Fe²⁺ diagram 1、2、3、4 黑云母演化趋势线转引自 Eby(1998,2004),5、6 转引自 邱家骧等(1993);1—Ilomba-Ulindi 岩体,非洲马拉维的尼亚萨碱性岩省;2—Igdlerfigsalik 岩体,南格陵兰;3—Magnet Cove,阿肯色碱性岩省,阿肯色州;4—Junguni 岩体,Chilwa 碱性岩省,马拉维;5—钾玄质煌斑岩;6—煌斑岩区
Biotite composition trends of 1 to 4 are after Eby(1998,2004), areas of 5 and 6 are after Qiu Jiexiang(1993)
1—Ilomba-Ulindi, North Nyasa-alkaline province, Malawi; 2— Igdlerfigsalik, South Greenland; 3—Magnet Cove, Arkansas alkaline province, Arkansas; 4—Junguni, Chilwa alkaline province, Malawi; 5—shoshonitic lamprophyre; 6—lamprophyre

表 4 黑云母分析结果(w_B/%)及主要参数表

Table 4 Chemical composition (w_B/%) and main parameters of micas

样品	1	2	3	4	5	6	7	
样号	zb16-11	zb16-13	zb18-8	zb28-1	zb29-4	zb29-6	zb02-f	
SiO ₂	37.76	36.71	39.40	38.37	39.89	39.08	40.19	39.04
TiO ₂	1.76	1.85	1.36	1.02	0.76	0.83	1.18	0.64
Al ₂ O ₃	12.89	13.79	12.31	12.12	12.66	12.70	10.12	13.31
FeO	16.81	17.97	15.86	16.46	12.38	12.32	14.35	11.72
MnO	0.29	0.31	0.38	0.53	0.29	0.24	0.47	0.36
MgO	14.79	13.62	16.04	16.09	19.35	18.76	16.38	19.23
CaO	0.00	0.03	0.00	0.07	0.00	0.01	0.03	0.00
Na ₂ O	0.19	0.21	0.14	0.10	0.13	0.11	0.11	0.19
K ₂ O	9.66	9.10	9.84	9.68	9.89	9.91	10.18	10.25
Cr ₂ O ₃	0.07	0.04	0.00	0.04	0.00	0.04	0.01	0.00
NiO	0.08	0.00	0.02	0.03	0.00	0.06	0.00	0.00
Total	94.30	93.63	95.35	94.51	95.35	94.06	92.91	95.89
Si	5.78	5.68	5.92	5.85	5.88	5.86	6.15	5.88
Al ^(IV)	2.22	2.32	2.08	2.15	2.12	2.14	1.83	2.12
Al ^(VI)	0.11	0.19	0.09	0.03	0.08	0.10	0.00	0.18
Ti	0.20	0.22	0.15	0.12	0.08	0.09	0.14	0.07
Fe ⁽²⁺⁾	2.15	2.32	1.99	2.10	1.53	1.54	1.84	1.43
Mn	0.04	0.04	0.05	0.07	0.04	0.03	0.06	0.04
Mg	3.38	3.14	3.59	3.66	4.25	4.19	3.75	4.19
Ca	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.06	0.06	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.05
K	1.89	1.80	1.88	1.88	1.86	1.89	1.99	1.91
Sum	15.82	15.78	15.80	15.90	15.88	15.89	15.81	15.89

注:1、7—霓辉正长岩(暗色矿物局部富集);2—含黑云母正长花岗岩;3—正长花岗岩(暗色矿物局部富集);4—霓辉正长岩;5—含透辉石-霓辉石正长花岗岩;6—含黑云母霓辉正长岩;以 22 个阳离子为基础计算。

省相比,其成分演化趋势与非洲马拉维的尼亚萨碱性岩省中的 Ilomba-Ulindi 正长岩体类似(Eby *et al.*, 1998, 2004),Al 均随着 Fe²⁺ 的增加而增加。但塔什库尔干碱性岩体的黑云母 SiO₂、Mg 含量较高,Al、Fe²⁺ 较低,其成分十分接近幔源的钾玄质煌斑岩(邱家骧等,1993),显示出一定的幔源特征。黑云母的这一特征说明在岩浆形成与演化过程中可能有少量地幔物质的贡献。

3 讨论与结论

据苦子干岩体的岩石化学与矿物的特征,苦子干岩体系富钾、钙和富碱的花岗岩类。根据 Barbarin (1999)花岗岩分类的标准,该岩体应归属为 PAG 型花岗岩类。PAG 型花岗岩类是一套以碱性花岗岩、碱性正长岩、正长岩和花岗岩为主的过碱性-碱性花岗岩类岩石组合,典型的矿物特征是含有钠质的碱性角闪石和辉石。但苦子干岩体与 PAG 型花岗岩类又有所不同,主要表现在碱性暗色矿物上。PAG 型花岗岩中的碱性暗色矿物,如辉石和角闪石为富钠辉石和角闪石,黑云母为碱性的富铁云母,而苦子干岩体的辉石中霓石分子只占 1.98~11.84,角闪石为钙质闪石,黑云母则以富镁为特征。

在苦子干岩体中,由正长岩类→石英正长岩→正长花岗岩,矿物的化学成分变化不大。霓辉正长岩的钾长石变化范围较宽,但大部分的成分与其他两种岩石类型的重叠,大都集中在 $Ab_{13-23}Or_{77-87}$ 范围内,与条纹长石主、客晶成分和比例推算出的结果相近。岩体中的斜长石排号均集中在 $An \approx 20$,也就是说从偏基性的正长岩类到较酸性的正长花岗岩类,斜长石的排号几乎未变,只是后者在数量上有所增加。暗色矿物透辉石-霓辉石、角闪石和黑云母的化学成分变化也不显著。这些矿物特征及其继承性说明正长岩类与正长花岗岩类不仅仅具有亲源关系,而且应该是同源的关系。但既然岩石中辉石环带化学成分的变化、角闪石反应边结构的存在和条纹长石的成分都说明岩浆在整个演化过程中结晶分离作用对岩浆演化影响不大,那么排除了辉石的分离结晶,作为同源的长岩类和正长花岗岩类又是一种什么样的演化关系呢?索列扩散作用应是较合理的机制。根据索列原理,由于熔体中温度不同,温度梯度驱动组分扩散,使高熔点的组分(Mg、Fe、Ca、Ti)向岩浆房的边缘扩散,形成成分梯度,最后在低温区高熔点组分(暗色矿物)集中。苦子干岩体中岩石类型与岩石结构的分布可能正是由索列扩散引起的,使岩体虽具有不同的岩石类型,但同时各类型中的矿物成分变化不大且具有暗色矿物(透辉石-霓辉石)的继承性,即岩体的边部以结晶颗粒较为粗大、暗色矿物较多的正长岩类为主,中部则以中细粒结构、暗色矿物少的正长花岗岩类为主。

根据黑云母的特征,在正长岩岩浆形成过程中可能有地幔物质的加入。目前对苦子干岩体的物质来源说法不一,主要有富集地幔源区(姜耀辉,2000;潘裕生等,2000)和下地壳(丁道桂,1996;Ducea *et al.*,2003)两种观点。苦子干岩体的稀土元素表现出无或极弱的负 Eu 异常,同时又无特征表明曾发生过斜长石的分离结晶作用,所以该岩浆来源深,至少来自斜长石不稳定区(罗照华等,2003)。其稀土元素分配模式具有高压型正长岩(粗面岩)的特点。Deng等(1998)基于实验成果,提出了低压和高压粗面岩(正长岩)两种不同成因的正长岩类,其中高压型正长岩类可由加厚陆壳底部岩石的局部熔融产生,留下榴辉岩相残余,具有无或弱负 Eu 异常。因此,无论苦子干的物质来源是地幔还是下地壳,有一点可以肯定,该正长岩岩浆来源较深。

本文通过对塔什库尔干苦子干岩体的矿物及矿

物化学特征的讨论,得出以下结论:

(1)苦子干杂岩是一种富钾的碱性花岗岩类。其地球化学特征和岩石矿物学特征表明其应归属为 Barbarin(1999)所划分的 PAG 型花岗岩类,但与 PAG 型花岗岩类又有所区别,主要表现在碱性暗色矿物上。PAG 型的碱性辉石为富钠辉石和角闪石,黑云母为碱性的富铁云母,而苦子干岩体的辉石中霓石分子只占 1.98~11.84,角闪石为钙质闪石,黑云母则以富镁为特征。

(2)苦子干岩体的正长岩类与其中部的正长花岗岩类系同源岩浆,二者的演化关系不是分离结晶作用造成的,而可能是由索列扩散作用造成的。根据黑云母的特征,在岩浆形成过程中可能有地幔物质的加入。

(3)岩浆演化的过程中,以平衡结晶为主,结晶分离作用不占主导。岩石中辉石环带化学成分的变化、角闪石反应边结构的存在和条纹长石的成分都说明岩浆在整个演化过程中结晶分离作用对岩浆演化影响不大。正长岩岩浆上升速度快,侵位浅。

References

- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments [J]. *Lithosphere*, 46 (3): 605~626.
- Cheng Qifen, Mao Jianren, Su Yuxiang, *et al.* 1987. Biotite in the intermediate-acid intrusive rocks in the middle-lower reaches of Changjiang [J]. *Publication of Nanjing Geology and Mineral Resource Institute of CAS*, (83): 56~70 (in Chinese).
- Deng J, Luo Zhaohua, Zhao Hailing, *et al.* 1998. Trachyte and syenite: petrogenesis constrained by the petrological phase equilibrium [A]. *Collected Works of International Symposium on Geological Science by Department of Geology* [C]. Beijing: Seismic Publishing House, 745~757.
- Ding Daogui, Wang Daoxuan, Liu Xinwei, *et al.* 1996. The Western Kunlun Orogenic Belt and Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House: 101~106 (in Chinese).
- Ducea M N, Lutkov V, Minaev V T, *et al.* 2003. Building the Pamirs: The view from the underside [J]. *Geology*, 31(10): 849~852.
- Eby G N. 2004. Petrology, geochronology, mineralogy and geochemistry of Beemerville alkaline complex, northern New Jersey [A]. Puffer J H and Volkert R A. Neoproterozoic, Paleozoic, and Mesozoic Intrusive Rocks of Northern New Jersey and Southeastern New York [C]. Twenty-first annual meeting geological association of New Jersey, Mahwah, NJ: 52~68.
- Eby G N, Woollody A, Vic Din and Garthplatt. 1998. Geochemistry and

- petrogenesis of nepheline syenites : Kasungu-Chipala , Ilomba , and Ulindi nepheline syenite intrusions , north Nyasa alkaline province , Malawi [J]. *Journal of Petrology* , 39(8) : 1 405 ~ 1 424 .
- Hammarstrom J M and Zen E-an . 1986 . Aluminum in hornblende : An empirical igneous geobarometer [J]. *American Mineralogist* , 71 : 1 297 ~ 1 313 .
- Holland and Jon Blundy . 1994 . Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole - plagioclase thermometry [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology* , 116 : 433 ~ 447 .
- Jiang Yaohui and Yang Wanzhi . 2000 . Geochemical characteristics and rock series of Himalayan granitoids in western Qinghai - Xizang plateau [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica* , 19(4) : 289 ~ 296 (in Chinese with English abstract) .
- Leake B E , Woolley 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 .
- Luo Zhaohua , Mo Xuanxue and Ke Shan . 2003 . Ages of Taxkorgan alkaline intrusive complex and their geological implications [J]. *Xinjiang Geology* , 21(1) : 46 ~ 50 (in Chinese) .
- Milan Rieder , Giancarlo Cavazzini , *et al.* (Translated and edited by Li Shengrong) . 2001 . Nomenclature of the mica [J]. *Acta Mineralogica Sinica* , 21(2) : 119 ~ 128 (in Chinese) .
- Morimoto N . 1988 . Nomenclature of pyroxenes [J]. *Schweiz Mineral Petrogr Mitt* , B68 : 95 ~ 111 .
- Nockolds S R . 1954 . Average chemical compositions of some igneous rocks [J]. *Bulletin of the Geological Society of America* , V(65) : 1 007 ~ 1 032 .
- Pan Yusheng . 2000 . Geological Evolution of the Karakorum - Kunlun Mountains [M]. Beijing : Sciences Publishing House , 209 ~ 258 (in Chinese) .
- Qiu Jiexiang . 1993 . Alkaline Rocks of Qinba region [M]. Beijing : Geology Publishing House : 1 ~ 175 (in Chinese) .
- The Second Team of Xinjiang Geological and Mineral Bureau . 1985 . The Geological Map of the West Part of the Southern Xinjiang (1 : 500 000) and Its Instruction [M]. Beijing : Geological Publishing house , 251 ~ 361 (in Chinese) .
- Valderez P F and Alcides N Sial . 1993 . Pyroxene and amphibole chemistry of peralkalic ultra-potassic Syenite and associated pyroxenite , northeastern Brazil : an approach to test liquid immiscibility process [J]. *Revista Brasileira de Geociencias* , 23(2) : 139 ~ 146 .
- Wang Zhonggang , Wang Yuanlong , Bi Hua , *et al.* . 2002 . Three alkaline rich intrusive rock belts in Kunlun Mountain and Altun Mountain area [J]. *Geology and Mineral Resources of South China* , 3 : 2 ~ 18 (in Chinese) .
- Xie Yingwen and Zhang Yuquan . 1998 . Amphiboles and pyroxenes in alkali-rich intrusions in eastern Qinghai - Xizang plateau and its adjacent area [J]. *Acta Mineralogica Sinica* , 18(1) : 90 ~ 96 (in Chinese with English abstract) .
- Zhang Yuquan and Xie Yingwen . 1994 . Alkali-rich intrusive rocks in the Qinghai - Xizang Plateau and its vicinities as exemplified by Kuganzi and Taihe plutons [J]. *Science in China (Ser B)* , 24(10) : 1 102 ~ 1 108 (in Chinese) .
- Zhang Yuquan and Xie Yingwen . 1997 . Geochronology of Ailaoshan - Jinshajiang alkalic-rich intrusive rocks and their Sr and Nd isotopic characteristic [J]. *Science in China (Series D)* , 27(4) : 289 ~ 293 (in Chinese) .

附中文参考文献

- 程启芬 , 毛建仁 , 苏郁香 , 等 . 1987 . 长江中下游中酸性侵入岩中的黑云母及其地质意义 [J]. *中国科学院南京地质矿产研究所所刊* , 18(3) : 56 ~ 70 .
- 丁道桂 , 王道轩 , 刘新伟 , 孙世群 . 1996 . 西昆仑造山带与盆地 [M]. 北京 : 地质出版社 , 101 ~ 106 .
- 姜耀辉 , 杨万志 . 2000 . 青藏高原西部喜马拉雅期花岗岩类特征及岩石系列 [J]. *岩石矿物学杂志* , 19(4) : 289 ~ 296 .
- 李胜荣摘译 . 2001 . 云母的命名 [J]. *矿物学报* , 21(2) : 119 ~ 128 .
- 罗照华 , 莫宣学 , 柯 珊 . 2003 . 塔什库尔干碱性杂岩体形成时代及其地质意义 [J]. *新疆地质* , 21(1) : 46 ~ 50 .
- 潘裕生 . 2000 . 喀喇昆仑山-昆仑山地区地质演化 [M]. 北京 : 科学出版社 , 209 ~ 258 .
- 邱家骥 , 李昌年 , 喻学惠 . 1993 . 秦巴碱性岩 [M]. 北京 : 地质出版社 , 1 ~ 175 .
- 王立本编译 . 2001 . 角闪石命名法——国际矿物学协会新矿物及矿物命名委员会角闪石专业委员会的报告 [J]. *岩石矿物学杂志* , 20(1) : 84 ~ 100 .
- 王中刚 , 王元龙 , 毕 华 , 等 . 2002 . 昆仑山-阿尔金山地区的三条富碱侵入岩带 [J]. *华南地质与矿产* , 3 : 2 ~ 8 .
- 谢应雯 , 张玉泉 . 1998 . 青藏高原东部及邻区富碱侵入岩中的角闪石和辉石 [J]. *矿物学报* , 18 : 90 ~ 96 .
- 新疆地质矿产局二大队 . 1985 . 新疆南疆西部地质图(1 : 50 万) 及说明书 [M]. 北京 : 地质出版社 , 251 ~ 361 .
- 张玉泉 , 谢应雯 . 1994 . 青藏高原及邻区富碱侵入岩——以苦子干和太和二岩体为例 [J]. *中国科学 (B 辑)* , 24(10) : 1 102 ~ 1 108 .
- 张玉泉 , 谢应雯 . 1997 . 哀牢山-金沙江富碱侵入岩年代学和 Nd , Sr 同位素特征 [J]. *中国科学 (D 辑)* , 27(4) : 289 ~ 293 .