

西昆仑康西瓦西部早古生代侵入岩的岩浆混合作用

王炬川¹, 崔建堂^{1,2}, 罗乾周¹, 朱海平¹, 边小卫¹,

张汉甫¹, 贾忠胜¹, 王 峰¹, 葛双民¹

WANG Ju-chuan¹, CUI Jian-tang^{1,2}, LUO Qian-zhou¹, ZHU Hai-ping¹, BIAN Xiao-wei¹,
ZHANG Han-fu¹, JIA Zhong-sheng¹, WANG Feng¹, GE Shuang-min¹

1. 陕西省地质调查院, 陕西 咸阳 712000; 2. 长安大学地球科学与空间学院, 陕西 西安 710054

1. *Shaanxi Institute of Geological Survey, Xianyang 712000, Shaanxi, China;*

2. *School of Earth Sciences and Space, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China*

摘要: 三十里营房以北广泛发育早古生代侵入岩, 据岩性可分为中基性、中酸性和酸性3类。中基性岩以辉石闪长岩为主, 暗色矿物中常见辉石, 斜长石多为中长石。中酸性岩以石英闪长岩为主, 岩石结构不均一, 广泛发育深源暗色包体。这些包体多数与寄主岩石界线清楚, 少部分呈现过渡关系, 镜下可见不平衡矿物共生和反相矿物包裹的现象, 显示出岩浆混合作用的特征。酸性侵入岩以中粗粒二长花岗岩为主, 岩石中含有少量包体, 包体的特征与中酸性侵入岩中的相同。中基性岩和酸性岩分别代表了该区寒武纪第一次地幔分异、陆壳垂向增生和晚奥陶世—早志留世西昆仑地区造山后去根的过程中, 第二次基性岩浆广泛贯入, 其热源又引发了下地壳物质大规模部分熔融生成大量的花岗岩质浆, 造成陆壳第二次垂向增生。

关键词: 西昆仑, 康西瓦西部, 早古生代, 岩浆混合作用, 壳幔作用, 造山带

中图分类号: P588.12 P588.11+5 文献标识码: A 文章编号: 1671-2552(2006)12-1458-11

Wang J C, Cui J T, Luo Q Z, Zhu H P, Bian X W, Zhang H F, Jia Z S, Wang F, Ge S M. Magma mingling of Early Paleozoic intrusive rocks in western Kangxiwar, West Kunlun, China. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(12): 1458-1468

Abstract: Early Paleozoic intrusive rocks are widespread north of Sanshilifang. They may be divided into the intermediate-basic, intermediate-acid and acid types. The intermediate-basic rocks consist predominantly of pyroxene diorite. The dark-colored minerals are commonly pyroxene and plagioclase is mostly andesine. Intermediate-acid rocks are dominated by quartz diorite, which has an inhomogeneous petrofabric and in which deep-seated, dark-colored xenoliths are commonly seen. Most of these xenoliths have clear-cut boundaries with their host rocks, while a few show transitional phenomenon. Under the microscope, association of unbalanced minerals and enclosure by antiphase minerals may be observed and the features of mingling of magma are conspicuous. Acid intrusive rocks are composed mainly of medium- and coarse-grained monzogranite. They contain a small number of xenoliths, whose features are the same as intermediate-acid intrusive rocks. Intermediate-basic rocks and acid rocks represent two successive continental crustal vertical growths respectively. The first mantle differentiation and continental crustal vertical growth occurred in the study area in the Cambrian, while the second extensive intrusion of basic magma occurred during post-orogenic derooting in the West Kunlun in the Late Ordovician-Early Silurian and its heat source resulted in large-scale partial melting of lower crustal material, thus generating large amount of granitic magma and leading to the second vertical growth of continental crust.

Key words: West Kunlun; western Kangxiwar; Early Paleozoic; mingling of magma; crust-mantle action; orogenic belt

收稿日期: 2006-04-10; 修订日期: 2006-09-25

地质项目: 中国地质调查局项目《1:25万康西瓦幅等4幅区域地质调查》(编号200313000003)部分成果。

作者简介: 王炬川(1965-), 男, 高级工程师, 从事区域地质调查工作。E-mail: kxwxm125@sina.com

圈闭和详细的岩石学、岩石地球化学、同位素测年等研究的前提下,对岩体中广泛存在的深源暗色包体给予了充分的关注。本文拟对暗色包体从岩石学、地球化学、同位素年代学等方面进行较细致的分析,以探讨该区早古生代深部岩浆混合、壳-幔相互作用及其与陆壳生长的关系。

1 区域地质特征和岩体的岩相学特征

研究区位于西昆仑山中段、三十里营房—康西瓦北侧,构造上处于康西瓦断裂以北、库地—其曼于特断裂以南,属中昆仑微陆块^①。在1:25万康西瓦幅区调过程中,在该微陆块上发现了一条早古生代蒙古包—普守蛇绿混杂岩带(另文发表),将中昆仑微陆块进一步细分为中昆仑北带和中昆仑南带2个次级微陆块(图1)。研究区内侵入岩非常发育,约占基岩露头面积的40%~50%。依据岩石组合特征及其产出的构造位置,将早古生代侵入岩划分为中基性、中酸性和酸性3类,后2类侵入岩中含有较多暗色包体,特别是中酸性侵入岩中包体含量非常丰富,是本文研究的重点对象。

1.1 中基性侵入岩

研究区内中基性岩主体以岩枝状产于蒙古包一带,面积约125 km²,侵入于蓟县系桑株塔格岩群或长城系赛图拉岩群的一套中深变质碎屑岩和碳酸盐岩之中,又被中酸性

岩脉动侵入。侵入界面多向外陡倾、围岩接触变质作用不明显。

中基性侵入岩主要岩性为深灰色中细粒暗色角闪闪长岩,其次为细粒角闪黑云石英闪长岩等,二者之间为涌动或脉动侵入关系,露头上以小规模不规则团块状混杂在一起,变化无规律,岩石组成不均匀。暗色角闪闪长岩呈深灰色、细粒半自形粒状结构,块状构造。矿物粒径以0.3~1 mm为主,少数1~2 mm。主要矿物为斜长石(50%~53%)、角闪石(36%~38%)、黑云母(6%~8%)、透辉石(1%)。细粒角闪黑云石英闪长岩呈绿灰色,块状构造,细粒半自形柱状结构,矿物粒径0.6~1 mm,主要矿物有斜长石(51%~54%)、角闪石(13%~14%)、黑云母(18%~20%)、石英(13%~15%)、透辉石(1%)。

中基性侵入岩的共同特征:暗色矿物(黑云母+角闪石)含量高,一般超过30%,斜长石牌号高,An=46~48,为中长石;含有辉石(透辉石),角闪石和辉石普遍发生次闪石化。

1.2 中酸性侵入岩

中酸性侵入岩是本文研究的重点,呈带状展布于蒙古包—普守蛇绿混杂岩带的北侧附近或康西瓦—苏巴什结合带北侧附近。单个侵入体呈长条状、不规则枝杈状产出,岩体规模较大,在研究区内出露面积达650 km²。岩体侵入于蓟县系桑株塔格岩群或长城系赛图拉岩群的一套中深变质碎屑岩

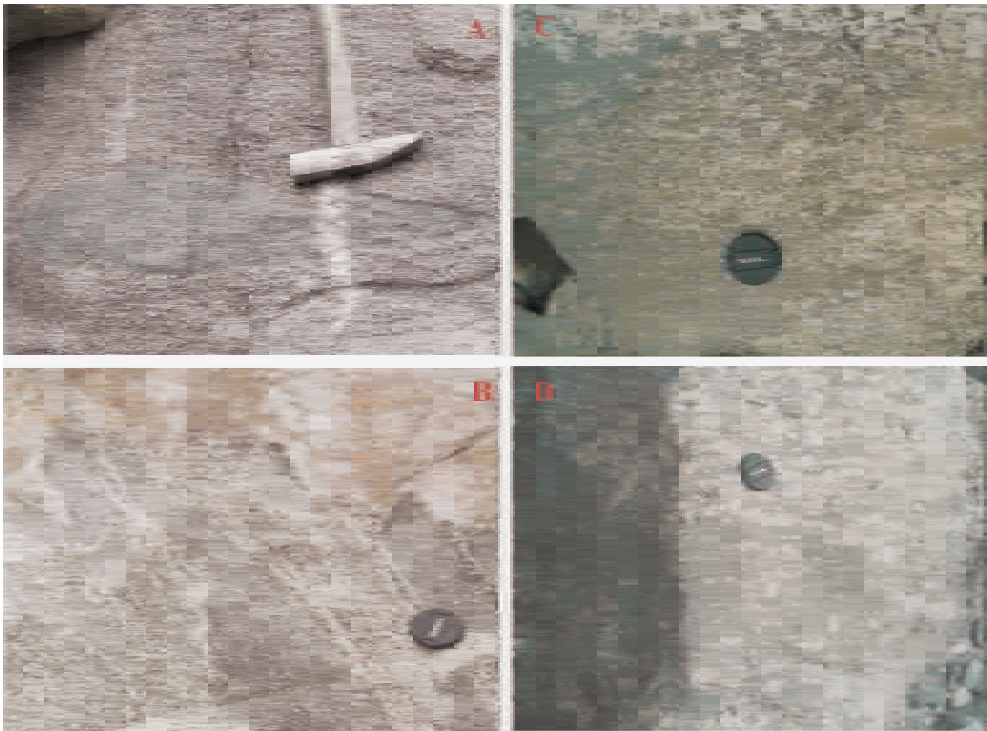


图2 包体与寄主岩石的宏观关系

Fig.2 Macroscopic relation between xenoliths and their host rocks

A—多数包体与围岩的界线清晰;B—少数包体与围岩呈混染关系;C—包体与围岩的界线模糊,呈残影状产出;D—包体中见有较多的寄主岩石的长石斑晶

① 西安地质矿产研究所,《青藏高原空白区基础地质综合研究》项目的构造单元划分方案,2005.

及碳酸盐岩之中,侵入界面多向外陡倾,与碳酸盐岩接触处见有较明显的交代变质作用,形成透闪石化大理岩。

中酸性岩体内不均匀地含有较多的暗色包体,多呈浑圆状,大小3 cm×5 cm到15 cm×20 cm,与围岩大部分界线清晰(图2-A),少部分呈过渡关系,局部还可见包体呈残影状出现(图2-B)。露头还常见包体中含寄主岩石中的长石斑晶。包体有集中成群出现的趋势,局部含量可达30%,包体成分为闪长质。

中酸性侵入岩的岩石组成极不均匀,岩性变化大,主体组成岩石为灰色中细粒石英闪长岩和灰色中细粒角闪黑云母英云闪长岩,局部地段岩性为中粒角闪黑云花岗岩闪长岩,各岩性单元之间无截然界线,并且岩性变化无规律。岩石呈灰色、浅灰色、灰白色,为中细—中粒半自形粒状结构,块状构造。矿物粒径0.8~2 mm,少数2~3 mm。主要矿物有斜长石(45%~65%)、石英(10%~23%)、钾长石(3%~15%)、黑云母(8%~10%)、角闪石(5%~10%)。另外镜下还可见到明显的不平衡矿物出现,如石英包裹次闪石,而次闪石中又包裹有石英(图3-a),角闪石中包裹有细小的黑云母、石英、斜长石颗粒(图3-b),次闪石中包裹斜长石细小晶体(图3-c)等。

中酸性侵入岩的共同特征:暗色矿物(黑云母+角闪石)含量较低,一般小于20%;斜长石牌号低,An=26~28,为更长石;不含辉石(透辉石)。

包体岩性为细粒黑云角闪闪长岩、细粒角闪黑云英云闪长岩,岩石呈深灰、灰绿色,细粒半自形粒状结构,块状构造,主要矿物为斜长石(42%~54%)、角闪石(8%~35%)、石英(1%~22%)、黑云母(10%~15%)、纤闪石(1%~2%)、钾长石(4%~5%)、绿帘石+黝帘石(3%~4%)。包体成分变化较大,特别是石英和暗色矿物含量差别明显;镜下可见角闪石中包裹有粒状石英(图3-d),岩石中大小不同的2种斜长石共生(图3-e),小者一般0.5~0.6 mm,洁净并发育聚片双晶,大者2~3 mm,晶体中心部分强绢云母化,双晶不清,应为不同世代的矿物。

1.3 酸性侵入岩

酸性侵入岩呈带状展布于蒙古包—普守早古生代蛇绿构造混杂岩带的两侧附近,岩体规模巨大,在研究区内面积达900 km²。单个侵入体呈椭圆状或水滴状产出,侵入于蓟县系桑塔格岩群的一套中深变质碎屑岩和碳酸盐岩之中或长城系赛图拉岩群的一套变质碎屑岩和碳酸盐岩之中,围岩接触变质作用不明显,侵入界面多向外陡倾。

普守西的塔什达拉岩体的中心部位存在较多的中基性岩岩枝,呈不规则椭圆形产出,宽度超过200 m。岩枝以色深、偏基性为特征,以细粒的次闪石化黑云母闪长岩为主,其次为中细粒次闪石化黑云石英闪长岩,露头可见前者脉动侵入于后者之中。岩体中含有较多的石英闪长质包体,但相对于中酸性岩,暗色包体含量明显减少,普遍不足1%。包体分布不均,在岩体中心相对富集,向边部有减少的趋势。包体大小不一,从5 cm×10 cm到20 cm×30 cm不等,多呈浑圆形,与围岩界线清楚,少部分具有明显的过渡关系,露头还见到包体在

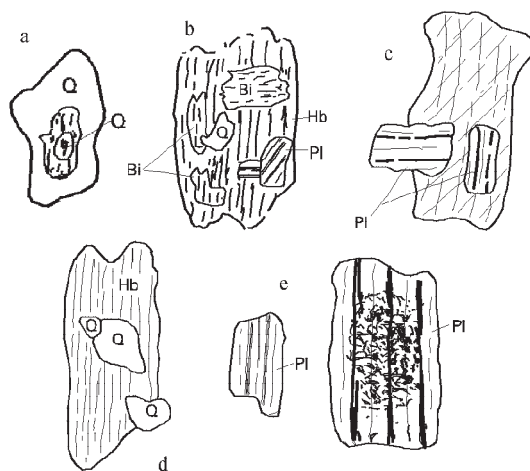


图3 早古生代中酸性侵入岩镜下岩浆混合特征素描

Fig.3 Sketch showing the microscopic features of mingling of magma of Early Paleozoic intermediate-acid rocks

a—石英包裹次闪石,次闪石又包裹有石英 b—角闪石中包裹有细小的黑云母、石英、斜长石颗粒 c—一次闪石中包裹斜长石细小晶体; d—角闪石中包裹有粒状石英 e—两种大小悬殊的斜长石共生

寄主岩石中呈残影状出现(图2-C),包体中含寄主岩石中的长石斑晶(图2-D)。

酸性侵入岩的岩性相对均匀,主要岩性为灰白色中—中粗粒斑状角闪黑云二长花岗岩、灰白色中粒少斑状黑云母二长花岗岩。岩石以发育似斑状结构为特征,斑晶最大可达40 mm。岩石呈浅灰—灰白色,中粒—中粗粒似斑状结构,块状构造。斑晶主要为半自形钾长石,含量为5%~25%;基质中主要成分为斜长石(25%~35%)、钾长石(10%~35%)、石英(20%~32%)、黑云母(4%~5%)、角闪石(小于3%)。钾长石似斑晶为半自形厚板状,洁净,格子双晶清晰,常包裹早期结晶的细小斜长石晶体;基质中斜长石呈半自形柱状,晶体较洁净,双晶不发育,显示钠长石律双晶和个别的卡钠复合双晶,An=24~28;钾长石呈他形粒状,部分具钠长石条纹结构,系条纹微斜长石和微斜长石。

包体岩性为中—细粒次闪石化黑云母石英闪长岩,岩石呈绿灰色,中细粒半自形粒状结构,块状构造。矿物粒径70%为1~2 mm,其余为2~3 mm,主要矿物组成为斜长石(57%~58%)、黑云母(13%~14%)、次闪石(10%~12%)、石英(16%~17%)、辉石(1%)。岩石中次闪石呈自形短柱状,无色或很浅的绿色,个别晶体中心残余辉石,说明次闪石由辉石变来。其他组构特征与中酸性侵入岩中的包体组构相同。

2 岩体和包体的地球化学特征

2.1 岩石化学

各类岩石的岩石化学成分含量见表1,岩石化学特征见表2。在SiO₂对主要氧化物的哈克图(图4)上,包体、中基性岩、

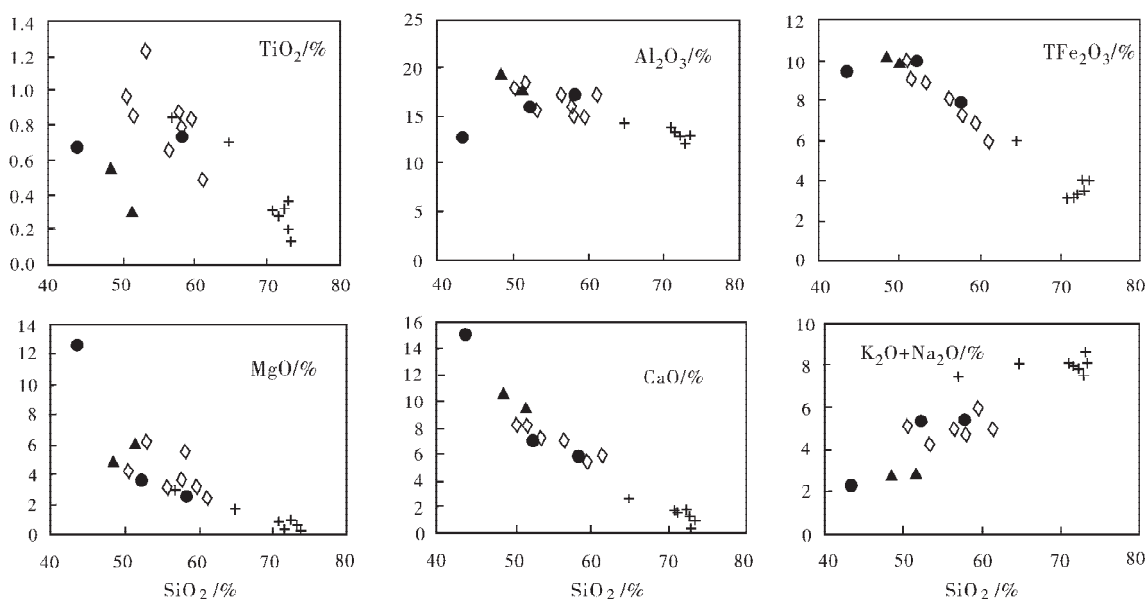


图4 早古生代侵入岩哈克图解

Fig.4 Haker diagram of Early Paleozoic intrusive rocks
●—包体 ;▲—中基性岩 ;◇—中酸性岩 ;+—酸性岩

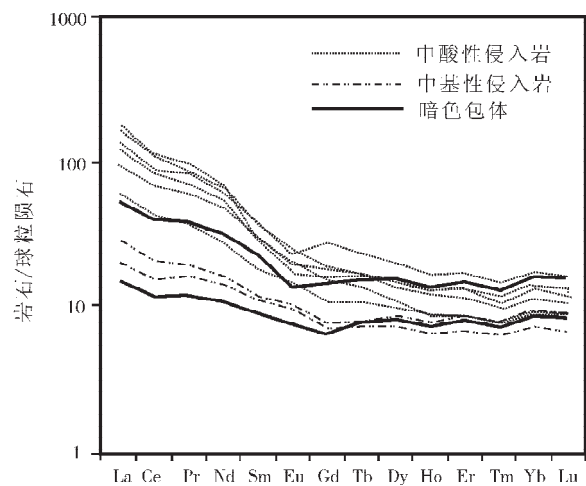


图5 包体、中基性岩、中酸性岩的稀土元素配分模式

Fig.5 REE distribution patterns for xenoliths ,
intermediate-basic rocks and intermediate-acid rocks

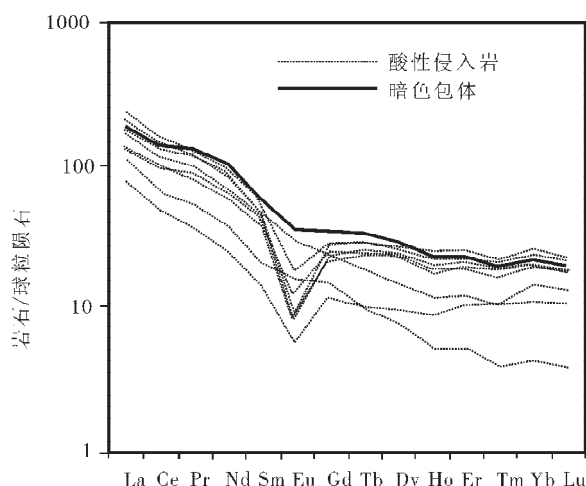


图6 包体、酸性岩的稀土元素配分模式

Fig.6 REE distribution patterns for
xenoliths and acid rocks

中酸性岩和酸性岩随 SiO_2 含量增加, TFe_2O_3 、 MgO 、 CaO 减少, 表现出明显的线性负相关, 而 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 则表现出明显的正相关, TiO_2 和 Al_2O_3 呈弱的负相关。图4还显示, 中酸性岩与酸性岩之间存在着一个明显的间断区, 仅有少数酸性岩与中酸性岩“混”在了一起, 而中酸性岩区间内 TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 的含量变化较大。

2.2 稀土元素

稀土元素含量及特征参数见表1。中酸性侵入岩中的包

体与中基性岩具有基本相似的稀土元素含量特征, 具体表现为 ΣREE 较低, 普遍小于 100×10^{-6} , 轻重稀土有较弱的分馏, Eu 正异常或亏损不明显, 稀土元素配分曲线为向右微倾的平滑曲线(图5中的粗线)。中酸性侵入岩表现出 ΣREE 较高, 普遍大于 100×10^{-6} , 轻重稀土具有较明显的分馏, Eu 亏损不明显或弱亏损, 稀土曲线为向右微倾的平滑曲线(图5中的细线)。酸性侵入岩表现出 ΣREE 高, 多数大于 250×10^{-6} , 轻重稀土有较明显的分馏, Eu 亏损明显, 稀土曲线为

表1 早古生代侵入岩主量元素、稀土元素、微量元素分析结果
Table 1 Major element, trace element and REE analyses of Early Paleozoic intrusive rocks

分类 样品号	包体1			包体2			包体3			中基性岩			中酸性岩						酸性岩						岩		
	3506/3	1194/2	1229/2	3519/2	3505/2	48.5	51.48	56.46	51.65	50.49	61.2	57.73	59.52	53.27	58.03	1233/2	261/1	2222/5	238/1	1178/1	3507/1	249/1	256/1				
SiO ₂	43.46	58.06	52.17			48.5	51.48	56.46	51.65	50.49	61.2	57.73	59.52	53.27	58.03	64.72	57.03	73.07	72.91	73.35	72.2	71.57	71.07				
TiO ₂	0.68	0.75	2.34			0.55	0.31	0.66	0.86	0.97	0.49	0.86	0.82	1.24	0.8	0.7	0.86	0.19	0.36	0.12	0.3	0.28	0.29				
Al ₂ O ₃	12.98	17.2	15.84			19.38	17.73	17.13	18.32	17.74	17.21	15.89	14.86	15.62	15.35	14.26	16.08	12.58	12.45	12.88	12.92	13.3	13.92				
Fe ₂ O ₃	2.72	0.90	2.37			2.09	1.95	1.45	2.38	0.72	1.07	1.38	1.51	1.21	1.11	1.21	1.98	1.04	0.16	0.62	0.40	0.47	0.75				
FeO	6.7	6.93	7.62			8.12	7.96	6.66	6.66	9.23	4.9	6.52	5.35	7.63	6.16	4.72	5.25	2.34	3.86	3.34	2.93	2.66	2.37				
MnO	0.19	0.14	0.16			0.2	0.2	0.15	0.17	0.18	0.12	0.14	0.13	0.14	0.12	0.08	0.12	0.04	0.05	0.1	0.06	0.05	0.04				
MgO	12.62	2.77	3.59			4.94	6.1	2.97	3.64	4.29	2.51	3.51	3.22	6.23	5.56	1.66	2.98	0.53	0.33	0.3	0.86	0.46	0.72				
CaO	14.94	6.12	7.25			10.75	9.58	7.08	7.92	8.23	5.85	5.97	5.38	7.24	5.81	2.62	6.28	0.37	1.32	0.92	1.68	1.65	1.58				
Na ₂ O	1.67	3.07	3.06			2.37	2.19	2.8	2.57	2.77	3.02	2.38	2.49	3.2	3.2	2.92	3.31	2.94	3.65	3.68	3.18	2.91	4.27				
K ₂ O	0.76	2.14	2.23			0.48	0.72	2.11	2.85	2.35	1.91	2.9	3.48	1.03	1.6	5.12	4.09	5.65	3.83	4.4	4.58	5.1	3.8				
P ₂ O ₅	0.08	0.14	0.99			0.09	0.08	0.17	0.26	0.24	0.2	0.32	0.3	0.24	0.17	0.15	0.42	0.02	0.08	0.04	0.07	0.08	0.08				
TF ₂ O ₃	9.42	7.83	9.99			10.21	9.91	8.11	9.04	9.95	5.97	7.90	6.86	8.84	7.27	5.94	7.23	3.38	4.02	3.96	3.33	3.13	3.12				
H ₂ O ⁺	1.98	1.74	1.98			1.88	1.66	1.6	2.52	1.38	1.2	1.6	1.98	2.12	1.4	1.34	1	0.96	0.54	0.5	0.76	0.52	0.56				
CO ₂	0.7	0.23	0.14			0.57	0.35	0.59	0.23	0.95	0.44	0.5	0.44	0.32	0.41	0.41	0.41	0.09	0.23	0.23	0.44	0.5	0.14				
LOI	1.8	0.94	1.49			1.27	1.13	1.54	1.95	1.12	1.24	1.08	1.79	1.64	0.95	1.25	0.62	0.94	0.12	0.01	0.7	0.71	0.43				
Total	101.28	101.13	101.23			101.19	101.44	101.37	101.98	100.66	101.36	100.78	101.27	101.13	100.67	101.15	100.43	100.76	99.89	100.49	101.08	100.26	100.02				
A/CNK	0.42	0.93	0.77			0.81	0.81	0.87	0.84	0.8	0.97	0.89	0.84	0.8	0.87	1.12	0.76	1.08	0.99	1.03	0.98	1	0.99				

续表 1

分类	包体1	包体2	包体3	中基性岩	中酸性岩				酸性岩												
样品号	3506/3	1191/2	1229/2	3519/2,3505/2	1191/1	2201	232/1	3504/5	1209/1	2683/1	1173/3	1173/2	1233/2	261/1	2222/5	238/1	1178/1	3507/1	249/1	256/1	
La	4.65	16.89	63.03	6.36	9.49	39.41	44.19	30.64	58.9	51.48	52.43	17.15	19.1	79	43.66	73.47	65.09	26.52	45.18	54.03	36.63
Ce	10.51	36.37	137.8	14.67	19.51	79.05	87.25	64.17	106.6	103.5	104.5	38.09	38.75	159.9	93.43	148.4	136.6	49.16	95.28	113.9	67.52
Pr	1.377	4.489	16.04	1.903	2.303	8.65	9.814	7.545	10.65	11.29	11.23	4.697	4.358	16.78	10.79	15.6	14.98	4.788	10.31	12.35	6.859
Nd	6.233	18.76	65.08	8.601	9.698	32.72	37.78	30.14	37.01	41.99	41.51	20.53	17.35	60.12	42.33	56.4	56.48	16.03	37.38	41.8	23.975
Sm	1.726	4.522	12.72	2.205	2.301	5.982	7.5905	6.056	5.894	7.501	7.307	5.171	3.694	11.13	9.014	10.67	9.76	3.2195	8.02	8.788	4.518
Eu	0.544	0.991	2.737	0.681	0.736	1.285	1.745	1.520	1.431	1.575	1.835	1.582	1.067	1.376	0.978	0.884	2.284	0.470	0.645	0.647	1.263
Gd	1.975	4.384	11.35	2.240	2.216	5.339	8.506	5.456	4.739	6.076	5.930	4.806	3.427	9.851	8.248	9.50	7.512	3.869	7.011	7.665	5.039
Tb	0.377	0.748	1.766	0.373	0.383	0.852	1.133	0.861	0.664	0.902	0.855	0.760	0.548	1.624	1.326	1.623	1.015	0.550	1.263	1.305	0.558
Dy	2.475	4.809	9.392	2.305	2.399	4.859	6.179	4.583	3.35	4.945	4.462	4.315	3.176	9.374	7.623	9.592	5.017	3.251	7.717	7.761	2.539
Ho	0.517	0.986	1.819	0.476	0.513	0.921	1.208	0.955	0.635	0.965	0.849	0.81	0.63	1.804	1.172	1.892	0.917	0.696	1.514	1.514	0.417
Er	1.603	3.072	5.22	1.469	1.609	2.805	3.579	2.867	1.877	3.004	2.413	2.314	1.842	5.65	1.411	5.812	2.684	2.358	1.75	4.703	1.138
Tm	0.232	0.436	0.681	0.207	0.235	0.386	0.5	0.376	0.251	0.406	0.337	0.3	0.25	0.745	0.594	0.816	0.362	0.374	0.711	0.637	0.137
Yb	1.614	3.102	4.341	1.408	1.7	2.558	3.359	3.56	1.665	2.828	2.304	1.939	0.672	4.931	3.93	5.549	2.317	2.894	4.81	3.967	0.891
Lu	0.251	0.479	0.639	0.206	0.265	0.39	0.507	0.318	0.251	0.43	0.33	0.274	0.249	0.728	0.59	0.8	0.356	0.446	0.707	0.552	0.130
ΣREE	34.08	99.94	332.8	43.10	53.36	185.2	214.1	158.4	233.9	236.8	236.2	102.7	96.11	412.3	228.4	340.8	305.4	114.6	225.3	262.7	151.6
(La/Yb) ₀	1.71	3.23	8.62	2.68	3.31	9.15	7.81	7.11	21.0	10.8	11.1	5.28	6.78	9.53	6.60	7.86	16.68	5.44	5.58	8.09	24.11
δEu	0.993	0.746	0.748	1.02	1.08	0.747	0.731	0.870	0.876	0.758	0.903	1.018	0.990	0.131	0.374	0.223	0.857	0.450	0.582	0.258	0.892

续表 1

分类	包体1	包体2	包体3	中 基 性 岩	中 酸 性 岩								酸 性 岩								岩
样品号	3506/3	1194/2	1229/2	3519/2	3505/2	1194/1	220/1	232/1	3504/5	1209/1	2683/1	1173/3	1173/2	1233/2	261/1	2222/5	238/1	1178/1	3507/1	249/1	256/1
Cr	728	14.3	41.8	34.7	42.4	24	42.3	88.2	45.1	25.5	69.7	190	205	17.9	38.5	16.8	17.2	19.3	34.3	15.5	16.4
Ni	311.2	5.07	11.79	17.09	35.19	8.29	6.32	7.42	32.89	14.49	39.29	107.19	106.2	13.39	17.99	13.09	8.99	8.19	19.69	8.19	9.89
Co	47.6	11.8	21.4	24	32.3	11.4	8.07	21.5	10.1	15.1	15.1	28.7	22.6	10.9	14.6	1.74	3.42	1.68	5.33	2.95	4.36
Sc	24.9	12.9	19.6	40.1	38	14.6	14.4	30.9	10.6	15.2	14.9	21.2	19.1	11.8	14	3.28	8.28	0.91	4.95	4.3	5.72
Ba	112	288	704	89.3	240	629	730	604	1014	1006	1180	329	420	549	1675	423	536	154	289	442	792
Sr	91.8	304	485	281	228	415	382	317	588	386	441	405	343	134	508	56.6	105	110	97.4	85.8	186
Rb	49	138	126	20.6	59.8	103	243	113	78.2	115	112	37	60.5	218	157	259	203	327	324	234	154
Y	15	27.44	47.89	12.83	13.6	25.26	23.7	26.5	17.29	26.54	22.76	21.23	16.44	49.12	24.67	51.17	38.31	22.09	45.25	44.38	10.74
Zr	65.3	144	375	35.4	38.3	182	243	171	155	200	193	156	115	360	239	240	340	121	147	160	134
Nb	4.31	16.5	32.5	3.53	2.42	12.7	20.8	13.8	14.9	13.7	17.3	13.1	8.86	23	20.8	16.2	16.3	20.2	30.9	11.2	12.6
Hf	1.58	4.96	9.42	1.03	0.98	5.12	5.37	3.45	4.33	5.56	6.16	4.52	3.43	10	6.87	7.89	10.16	4.13	5.25	4.77	4.11
Ta	0.47	1.48	1.99	0.41	0.2	0.88	1.49	0.57	0.85	0.81	1.47	1.04	0.71	1.72	1.88	1.49	1.4	3.09	4.48	1.3	0.69
Th	1.65	8.03	8.43	0.14	1	10.2	14	1.33	3.81	12.6	14.9	3.77	6.28	47.3	20.5	35.6	20.6	24.9	1.04	33.9	17.9
Bi	0.83	0.14	0.07	0.13	0.6	0.21	0.37	0.04	1.97	0.07	0.05	0.08	0.16	0.42	0.12	0.54	0.14	0.88	0.66	0.17	0.08
Sb	0.27	0.63	0.12	1.03	0.63	7.41	0.12	0.08	0.26	0.68	0.44	2.34	4.98	0.49	0.73	13.7	0.68	0.31	0.67	0.6	0.54
P	349	610	4316	392	348	741	1010	818	872	1395	1308	1046	741	652	1831	87.2	349	174	305	349	349

注 :包体1—角闪闪长质包体 ;包体2—英云闪长质包体 ;测试单位为国家地质实验测试中心 ;分析方法——氧化物用X荧光光谱法 ,稀土元素用等
离子质谱法 ,微量元素除Ti、P、Ba、Sr采用等离子质谱法外 ,其他元素采用等离子质谱法 ;主量元素含量% ,稀土元素和微量元素含量 10^{-6}

表2 各类岩石的岩石化学特征对比

Table 2 Comparison of the chemical characteristics of various types of rock

类别	SiO ₂ 含量	基性组分含量 (FeO、MgO、CaO)	碱性组分含量 Na ₂ O+K ₂ O	Na ₂ O/K ₂ O	岩浆混合作用
包体1	显著偏低, 属基性岩类	显著偏高	显著偏低	>>1	浆混作用不明显
包体2	中等, 属中酸性岩类	中等	较高	>1	浆混作用明显
包体3	中等, 属中酸性岩类	中等	较高	>1	浆混作用明显
中基性岩	含量稳定, 偏低, 属中性岩类	偏高	较低	>>1	浆混作用不明显
中酸性岩	含量极不稳, 中等, 中酸性岩类	中等	较高	≥1	浆混作用明显且普遍
酸性岩	部分含量不稳, 偏高, 酸性岩类	偏低	显著偏高	<1	仅少部分具浆混特征

向右倾的V字形曲线;少数样品(图6中的虚线部分)稀土曲线特征接近于中酸性侵入岩的稀土特征;酸性岩中包体的稀土总量较高,轻重稀土中等分馏,Eu具弱的负异常。

2.3 微量元素

微量元素含量见表1。包体、中基性岩、中酸性岩在以MORB标准化的蛛网图(图7)中,表现为大离子亲石元素Sr、K、Rb、Ba、Th强烈富集,高场强元素Ta、Nb、Ce、P、Zr、Hf、Sm相对弱富集,曲线上出现了弱的Nb、P、Ti负异常。在酸性岩和其中的包体的蛛网图(图8)中,寄主岩石表现为大离子亲石元素K、Rb、Ba、Th强烈富集,高场强元素Ta、Nb、Ce、Zr、Hf、Sm相对弱富集,曲线上出现了极强的Ba、Nb、P、Ti负异常;相对于寄主岩石,包体中的Ba、Nb、P、Ti负异常不明显。

3 岩体形成时代

研究区较系统的侵入岩研究工作为1984年由新疆第一区域地质调查大队完成的1:100万西昆仑山康西瓦-喀喇昆仑山河尾滩地区的地质调查成果,其依据K-Ar法(黑云母、白云母、钾长石)年龄,将研究区侵入岩的时代划归海西—燕山期,这一成果为以后的众多地质工作者所引用。1989—2000年间先后有少数学者在研究区获得早古生代侵入岩的侵入年龄(Rb-Sr、K-Ar、U-Pb法)数据^[12,13],2003年以来开展的1:25万康西瓦幅区域地质调查工作,在三十里营房—康西瓦北侧一带取得了大量的早古生代侵入岩的成岩年龄,其中在酸性侵入岩3个侵入体中获得了447 Ma±1.0 Ma、430.7 Ma±2.6 Ma、443.1 Ma±2.3 Ma的年龄;1件中基性侵入岩样品中获得521 Ma±2.5 Ma(4个点)、440.5 Ma±4.6 Ma(11个点)和2个锆石SHRIMP U-Pb年龄(另文发表)。这些精确的成岩年龄表明研究区侵入岩的主体形成于早古生代。

4 岩浆混合作用讨论

4.1 岩浆混合的岩相学表现

三十里营房北侧早古生代侵入岩中含有大量暗色包体,特别是中酸性侵入岩中暗色包体极为丰富。包体具有明显的半自形粒状结构,块状构造,为典型的岩浆岩结构和构造,这些具有岩浆成因的微粒包体被大多数学者认为是岩浆混合

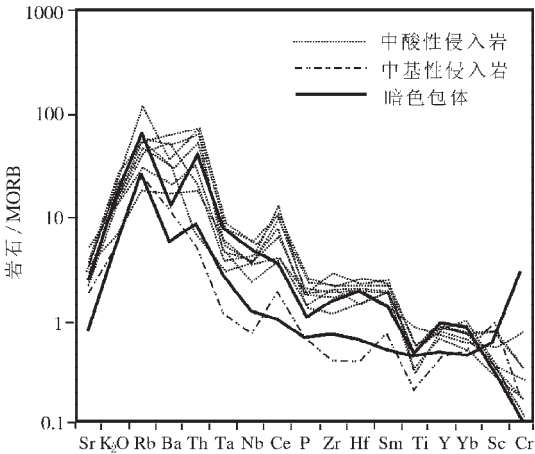


图7 包体、中基性岩、中酸性岩MORB 标准化微量元素蛛网图

Fig.7 MORB-normalized trace element patterns of xenoliths, intermediate-basic rocks and intermediate-acid rocks

成因的证据之一^[14-16]。中酸性侵入岩的岩性不均匀,野外露头可见岩石颜色及矿物含量有明显的变化,但又无截然界线,这种现象用同源岩浆演化难以解释;包体与寄主岩石界线多数较截然,少数呈过渡关系,部分成条带状、残影状出现;另外包体中常常出现寄主岩石中的长石斑晶,这些特征表明基性岩浆与酸性岩浆在塑性或半塑性状态下发生了机械混合,并且未达到均一化。前文述及的显微结构中的不平衡矿物组合和反相矿物包裹关系也支持这一观点。

塔什达拉酸性侵入岩中中基性岩岩枝和可见过渡边界的暗色包体的并存,表明中基性岩浆和酸性岩浆近于同期形成,并且在半塑性状态下发生了机械混合,2种基性岩石的出现表明至少有2期基性岩浆贯入。

4.2 岩浆混合的地球化学特征

研究区内的中酸性侵入岩具有相同的宏观特征和岩石组成,但其岩石化学成分含量差别较大, SiO₂含量变化于48.5%~61.20%之间,相应的FeO、MgO、CaO、Na₂O、K₂O均有

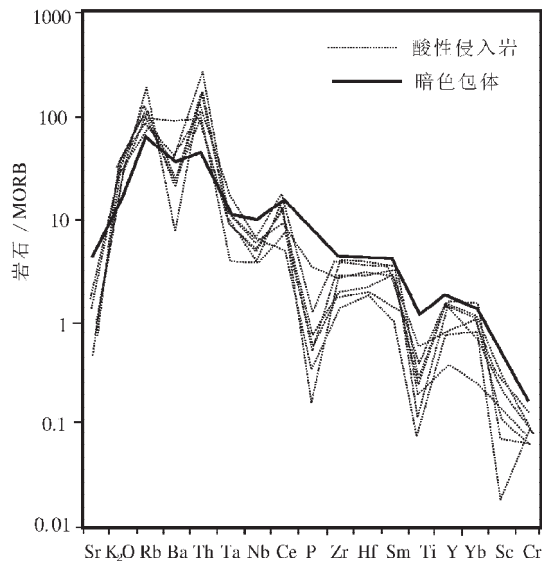


图8 包体、酸性岩的MORB标准化微量元素蛛网图

Fig.8 MORB-normalized trace element patterns of xenoliths and acid rocks

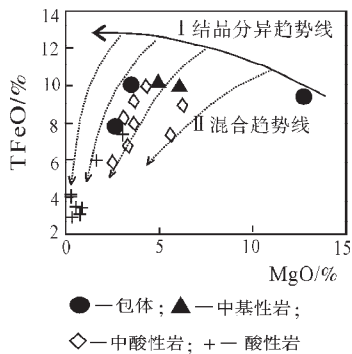


图9 TFeO-MgO图(据Zorpi, 1989)

Fig.9 TFeO-MgO diagram

较明显的变化,这表明岩浆未达到充分的化学混合。在SiO₂对氧化物的哈克图(图4)上,包体、中基性岩、中酸性岩、酸性岩表现出良好的线性相关,其中TFe₂O₃、MgO、CaO表现出明显的线性负相关,Na₂O+K₂O则表现出明显的正相关,TiO₂和Al₂O₃呈弱的负相关,这种良好的线性关系可能用岩浆混合来解释更好一些^[17]。在TFeO-MgO图解(图9)中,所有的点均落在混合趋势线上,反映出它们曾发生过化学混合。混合后的岩石投影点靠近基性端元一侧,表明混合岩浆岩中基性岩浆占的比例要大于酸性岩浆。

中酸性侵入岩中的包体与中基性侵入岩具有大致相似的稀土配分曲线特征(图5),反映二者可能具有相近的岩浆来源;中基性侵入岩稀土元素配分曲线总体上位于中酸性侵入岩稀土配分曲线的下方,较为平坦,Eu无明显亏损;而中酸性侵入岩稀土配分曲线则呈右倾平滑曲线,重稀土部分与包

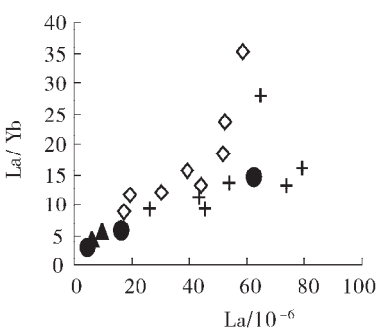


图10 La-La/Yb图解(图例同图9)

Fig.10 La-La/Yb diagram

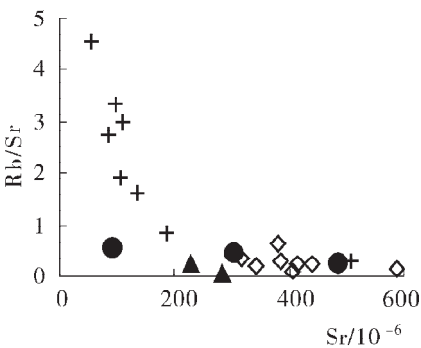


图11 酸性岩Sr-Rb/Sr图解(图例同图9)

Fig.11 Sr-Rb/Sr diagram of acid rocks

体的稀土曲线呈交叉状,反映二者可能有独立的岩浆源。酸性侵入岩稀土总量较高、曲线呈典型的V字形(图6),表明岩浆经历了明显的富Eu矿物的分离结晶作用;酸性岩中包体的稀土总量高于寄主岩石,表明包体不是岩浆结晶分异的堆积体^[18]。王中刚(1986)认为 $\delta\text{Eu}>0.7$ 的侵入岩主体由基性岩浆分异演化而来, δEu 为0.7~0.3的侵入岩主要由上地壳部分熔融而来, $\delta\text{Eu}<0.3$ 的侵入岩则多为酸性岩浆经完全的分异结晶作用形成的。研究区中基性岩及包体的 δEu 多数明显大于0.7,表明它们主要为幔源岩浆分异演化而来,酸性侵入岩的 δEu 则多数小于0.7,主体为壳源岩浆形成的中酸性侵入岩的 δEu 略大于0.7,具有壳幔混合的痕迹。

在微量元素蛛网图(图7、图8)中,较为相似的曲线特征表明形成包体、中基性岩、中酸性岩的岩浆演化经历了AFC过程,从而使闪长质包体和主岩显示出某些地球化学特征上的相似性。相对于包体和基性岩,中酸性岩较明显地亏损Nb、Ta、P、Ti,说明岩浆经历了含P、Ti等矿物的分离结晶作用,还表明岩浆为地壳来源或曾受到地壳物质的强烈混染^[18]。

在La-La/Yb图解(图10)中,包体、中基性岩、中酸性岩处在近于斜线的演化线上,与部分熔融曲线相重合,而酸性岩则倾向于近于水平的演化曲线上,与分离结晶曲线相一致。这一特征也反映大多数花岗岩岩浆演化以分离结晶作用为主,而包体、中基性岩、中酸性岩则以部分熔融或岩浆混合为主。

在Sr-Rb/Sr图解(图11)上,包体、中基性岩、中酸性岩构成了一条近水平的演化曲线,而酸性侵入岩则构成了向右陡倾的斜线,二者具有明显不同的岩浆演化形迹,反映出这些岩石具有不同的岩浆来源及演化历程^[9];另一方面,二者又有交汇之处,并且有少数酸性岩的样品落在中酸性岩的演化线上或附近,又表明少数酸性侵入岩与中基性侵入岩发生了岩浆混合作用。

4.3 岩浆混合与地壳生长

奥陶纪,西昆仑地区处于碰撞后构造环境,俯冲作用使本区岩石圈加厚、拆沉,软流圈物质上涌,注入下地壳底部,引起下地壳热异常而发生部分熔融,形成长英质岩浆。随着幔源岩浆的不断注入,下地壳部分熔融加剧,长英质岩浆不断熔出,混和作用开始。初始表现为基性熔浆团分散在长英质岩浆中的物理混合,随后发生化学成分的交换^[10]。研究区中基性、中酸性侵入岩中镁铁质微粒包体的岩石学和岩相学特征显示,该区的岩浆混合表现为相对少量的基性岩浆注入长英质岩浆中而产生的机械混合。从包体所代表的基性岩浆捕获了酸性岩浆中石英、长石等矿物来看,这种岩浆混合作用应发生在较浅部、压力较低的中深环境中,因为只有在这种环境下,石英和长石才是花岗岩类的液相线矿物^[10]。

中基性岩同一件样品中2个年龄段的获得,也表明该岩石经历了2期成岩过程:其中521 Ma可能代表了该区伴随着原特提斯初期的伸展,地幔大范围上隆,分异增生造成陆壳垂向增生的时代;而440.5 Ma、447 Ma、430.7 Ma、443.1 Ma这些年龄段非常集中,可能是酸性侵入岩大规模形成的时期,可能与下述过程相对应,即晚奥陶世—早志留世西昆仑地区造山后去根过程中,地幔上涌、二次基性岩浆广泛贯入,并与酸性岩浆混合,从而形成了该区以中酸性岩浆为主体的浆混花岗岩,加上大量酸性侵入岩的广泛贯入,促使陆壳第二次明显增生^[10-20]。

5 结论及意义

由以上的研究可以得出如下结论。

(1)三十里营房北侧一带存在早古生代岩浆混合作用,表现为以包体为代表的基性端元和以酸性侵入岩为代表的酸性端元以不同比例混合而形成的中酸性侵入岩。这表明该区早古生代存在着较为强烈的壳幔相互作用过程^[12-14]。这一成果为进一步研究西昆仑地区早古生代深部过程提供了新的素材。

(2)三十里营房北侧,乃至整个西昆仑地区,在早古生代存在2期明显的陆壳生长过程:早期于原特提斯初始形成时期地幔上隆,并分异出中基性岩浆,上侵并底辟于地壳底部,造成陆壳第一次增生;晚期发生于晚奥陶世—早志留世,西昆仑地区造山后去根过程中,地幔上涌、二次基性岩浆广泛贯入,并与酸性岩浆混合,从而形成了该区以中酸性岩浆为主体的浆混花岗岩,加上大量酸性侵入岩的广泛贯入,促使陆壳第二次明显增生。在第二次基性岩浆贯入的过程中,较广泛地引发了第一次贯入并底辟于地壳底部的基性岩浆岩(部分)熔融,所以在蒙古包南偏基性侵入岩中获得了早寒武世和晚奥陶世2期锆石SHRIMP U-Pb年龄值。

(3)西昆仑造山带为多个微陆块(多岛洋^[7])的拼合体,各微陆块间存在过或大或小的洋盆。然而,从现今造山带的组成看,各微陆块的边缘建造并不十分发育,这表明陆壳侧向增生并不明显;另一方面,壳幔多期次相互作用,引发大规模酸性岩浆的形成,造成陆壳多期次垂向增生非常明显,因此西昆仑山早古生代以来的陆壳生长以多期次的垂向增生为主。

致谢:本文实际材料主要来源于《1:25万康西瓦幅区域地质调查》项目,是项目全体人员的劳动成果;在成文过程中得到韩芳林博士、王根宝高级工程师的悉心指导;计文化博士在文献资料方面提供了很大帮助。在此一并致谢!

参考文献:

- [1]姜春发,王宗起,李锦轶,等.中央造山带开合构造[M].北京:地质出版社,2000.
- [2]邓万明.喀喇昆仑—西昆仑地区基性—超基性岩初步考察[J].自然资源学报,1989,5(3):1-11.
- [3]邓万明.西昆仑蛇绿岩研究的新进展[A].见:中国西部特提斯构造演化及成矿作用[C].北京:电子科技出版社,1991.
- [4]潘裕生.西昆仑山构造特征与演化[J].地质科学,1990(3):224-232.
- [5]潘桂棠,陈智梁,李兴振,等.东特提斯组成与地质演化[M].北京:地质出版社,2000.
- [6]丁道桂,王道轩,刘伟新,等.西昆仑造山带与盆地[M].北京:地质出版社,1996.
- [7]肖序常,王军,苏犁,等.再论西昆仑库地蛇绿岩及其构造意义[J].地质通报,2003,22(10):745-749.
- [8]王炬川,韩芳林,崔建堂,等.新疆于田普鲁一带早古生代花岗岩岩石地球化学特征及构造意义[J].地质通报,2003,22(3):170-181.
- [9]王晓霞,王涛,卢欣祥,等.北秦岭老君山、秦岭梁环斑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.
- [10]谌宏伟,罗照华,莫宣学,等.东昆仑造山带岩浆混合成因花岗岩的岩浆底侵作用机制[J].中国地质,2005,32(3):386-393.
- [11]刘成东,张文秦,莫宣学,等.东昆仑约格鲁岩体暗色微粒包体特征及成因[J].地质通报,2002,21(11):739-744.
- [12]张玉泉,谢应雯.三十里营房地区花岗岩类Rb-Sr等时年龄研究[J].自然资源学报,1989,4(3):222-227.
- [13]王元龙,王中刚,李向东,等.西昆仑加里东期花岗岩带的地质特征[J].矿物学报,1995,15(4):458-460.
- [14]周若.花岗岩混合作用[J].地学前缘,1994,1(1-2):87-97.
- [15]肖光辉,邓晋福,马大栓,等.花岗岩研究思维与方法[M].北京:地质出版社,2002:288-291.
- [16]周新民.岩浆混合作用与底侵作用[A].见:欧阳自远.世纪之交矿物岩石地球化学的回顾与展望[C].北京:原子能出版社,1998:82-85.
- [17]赵海滨,莫宣学,任院生,等.大兴安岭北端阿乌尼地区中生代杂岩体的岩浆混合作用[J].地质通报,2005,24(9):854-861.
- [18]赵寒冬,韩振哲,赵海滨,等.内蒙古东北部激流河花岗岩中包体的特征及成因[J].地质通报,2005,24(9):841-847.
- [19]孙德有,吴福元,林强,等.张广才岭燕山早期白石山岩体成因与壳幔相互作用[J].岩石学报,2001,17(2):228-233.
- [20]邵济安,韩庆军,张履桥,等.陆壳垂向增生的两种方式:以大兴安岭为例[J].岩石学报,1999,15(4):600-605.