

中昆仑耸石山地区晚古生代花岗岩地球化学特征、成岩作用与构造环境研究

柏道远 陈必河 孟德保 刘伟

(湖南地质调查院, 湖南湘潭 411100)

摘要: 昆仑山中段耸石山地区发育晚古生代花岗岩, 由石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩等 4 类岩石组成。岩石低硅、低钾、贫碱、富钠, SiO_2 和 K_2O 含量分别为 56.42%~73.70% 和 1.70%~3.56%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 平均 6.13%, Na_2O 平均 3.49%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值 0.51~0.99; 富铝, Al_2O_3 平均为 14.90%。总体属镁质、准铝质—弱过铝质钙质—钙碱性花岗岩。Ba、U、Nb、Ta、Sr、P、Ti 等表现为较明显但并不强烈的相对亏损, Rb、Th、K、La、Nd、(Zr+Hf+Sm)、(Y+Yb) 等则相对富集。 ΣREE 平均 105 $\mu\text{g/g}$; 轻稀土富集, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值平均 13.91; Eu 弱亏损或无亏损, δEu 值平均 0.85。石英闪长岩在主要氧化物 Harker 图解中显著偏离演化线, 且 δEu 值最低; 二长花岗岩 δEu 值最高; 岩石在 C/MF-A/MF 图解中落入不同区域; 多种同分母的氧化物比值相关图中未一致显示线性相关, 也未构成双曲线趋势; 在 La/Sm-La 图解中 4 类花岗岩未构成分异演化趋势; 花岗岩中发育岩浆混合成因镁铁质微粒包体等, 说明花岗岩源岩和岩浆具多源性, 岩浆形成过程中具岩浆混合作用。微量元素蛛网图特征, 氧化物与微量元素构造环境判别图解以及区域构造格局等, 表明花岗岩形成于岛弧环境。

关键词: 花岗岩; 地球化学特征; 成岩作用; 岛弧环境; 耸石山; 中昆仑

中图分类号: P588.12⁺1, P596 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2006)06-1236-10

近些年来, 随着大陆动力学研究的兴起, 位于青藏高原北侧的昆仑造山带的构造演化成了地质学家研究的焦点之一。潘裕生^[1-3]认为昆仑山是由多个地体在不同时代拼合而成。姜春发等^[4]以“开合”观点论述了昆仑山的组成与演化。殷鸿福等^[5]提出昆仑带曾经为多岛洋格局。许清华等^[6]称昆仑山为前锋弧, 并将塔里木盆地作为昆仑火山弧之后的晚古生代弧后盆地。尹福光等^[7]以多弧盆系观点论述了昆仑造山带的形成与演化。可见, 对昆仑造山带的构造演化认识还存在较多分歧, 要取得共识尚需要更深入全面的研究, 同时也离不开更多基础资料的支撑。笔者近年来在 1:25 万区域地质调查中, 对昆仑山中段耸石山地区晚古生代花岗岩进行了研究, 确定其为多物源的产物, 形成于岛弧环境, 为昆仑造山带的构造演化研究补充了资料。

1 区域地质概况

耸石山地区位于昆仑山中段昆仑地块的南缘, 以昆南断

裂与巴颜喀拉地块(三叠纪海槽)(图 1)分界。北面为红色砂砾岩、泥岩等组成的古近纪陆相断陷盆地沉积, 南面为三叠纪巴颜喀拉山群复理石沉积以及侏罗纪陆相盆地沉积, 区内则主要发育石炭—二叠纪火山—沉积建造, 并发育花岗岩质侵入岩体, 侏罗纪、古近纪陆相盆地沉积、第四纪冲洪积以及更新世安粗质火山岩^[8]等。

石炭—二叠纪火山—沉积建造由浅变质砂岩、板岩、灰岩、硅质岩、凝灰岩、玄武岩、安山岩等组成, 脆韧性断裂及脆韧性剪切带非常发育, 不同岩性体间也多呈构造接触, 总体层序不清, 组成岩石也普遍遭受动态重结晶、揉皱、糜棱岩化及片理化等强烈变质变形作用的改造, 整体呈一宽度很大的构造混杂岩带, 并具增生楔构造岩相特征。因沉积岩石重结晶和片理化等原因, 未能获得足够的化石资料, 仅在路线观察中采到鲕化石, 尽管由于化石内部重结晶强烈, 无法确定属种, 但其时代为石炭纪—二叠纪毫无疑问。对区内昆明沟一带玄武岩进行全岩 K-Ar 法(中国地质科学院地质研究所

收稿日期: 2005-10-08; 改回日期: 2006-02-20

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(200213000035)资助。

作者简介: 柏道远, 男, 1967 年生, 高级工程师, 主要研究方向为构造学和岩石学; E-mail: daoyuanbai@sina.com。

测定)和全岩 Ar-Ar 法(桂林矿产地质研究所测定)年龄测定,分别获得(270±37.8) Ma 和(279.60±2.34) Ma 的年龄值^①,属早二叠世。结合后述侵位花岗岩同位素年龄值来看,该套火山-沉积建造时代大致为石炭纪一二叠纪。

2 岩体地质及岩石学特征

耸石山地区花岗岩主要分布于横笛梁、清淀沟、怀玉岗等地,出露面积约 190 km²(图 1)。花岗岩侵入于变质砂岩、板岩、灰岩、凝灰岩等沉积岩及玄武岩等火山岩之中,近岩体围岩发生角岩化、大理岩化等热接触变质作用。侵入体主要由细粒黑云角闪石英闪长岩、细粒角闪石黑云母英云闪长岩、中细粒角闪黑云花岗岩闪长岩和细中粒—粗中粒黑云母二长花岗岩等 4 种岩性组成,各岩性单元之间多呈脉动接触关系,部分呈涌动接触关系,相邻单元间接触关系反映出相对基性岩石单元侵位较早。横笛梁岩体主要由二长花岗岩和少量花岗闪长岩组成,清淀沟岩体主要由石英闪长岩和英云闪长岩组成,怀玉岗岩体主要由英云闪长岩和花岗闪长岩组成。

主要岩体显示出主动就位机制。以面积最大的横笛梁岩体为例:该岩体地表形态呈不规则的椭圆状,侵入于石炭纪一二叠纪变质砂岩、板岩、粉砂岩地层中,近接触带 200~

1 000 m 范围内,地层产状与岩体接触带产状近一致。岩体近接触带附近叶理较发育,黑云母、长石等矿物较明显定向排列,与接触带产状平行。岩体内镁铁质暗色微粒包体发育,包体呈次椭圆状、条带状,大部分具定向排列,大致平行接触带分布。上述特征表明横笛梁岩体具主动强力就位特征。

石英闪长岩呈块状构造或定向构造,细粒花岗结构。主要矿物成分为:斜长石 53%,角闪石 40%,辉石 1%,黑云母 2%,石英 4%。斜长石排号 An 为 43。

英云闪长岩呈块状或定向构造,细粒花岗结构。主要矿物成分为:斜长石 57%~63%,角闪石 8%~14%,黑云母 15%~18%,石英 7%~18%,辉石 0~2%,钾长石 0~2%。斜长石排号 An 为 46。

花岗闪长岩具定向构造,细中粒—中粒花岗结构,部分具似斑状结构。主要矿物成分为:斜长石 48%~49%,角闪石 8%~12%,黑云母 9%~21%,钾长石 10%~13%,石英 21%~25%。斜长石 An 为 31~48。

二长花岗岩多具块状构造,部分具定向构造,细中粒—粗中粒花岗结构,少量微细粒结构,部分具似斑状结构。主要矿物成分:斜长石 29%~50%,钾长石 19%~38%,黑云母 5%~6%,石英 25%~34%。斜长石 An 为 18~23。

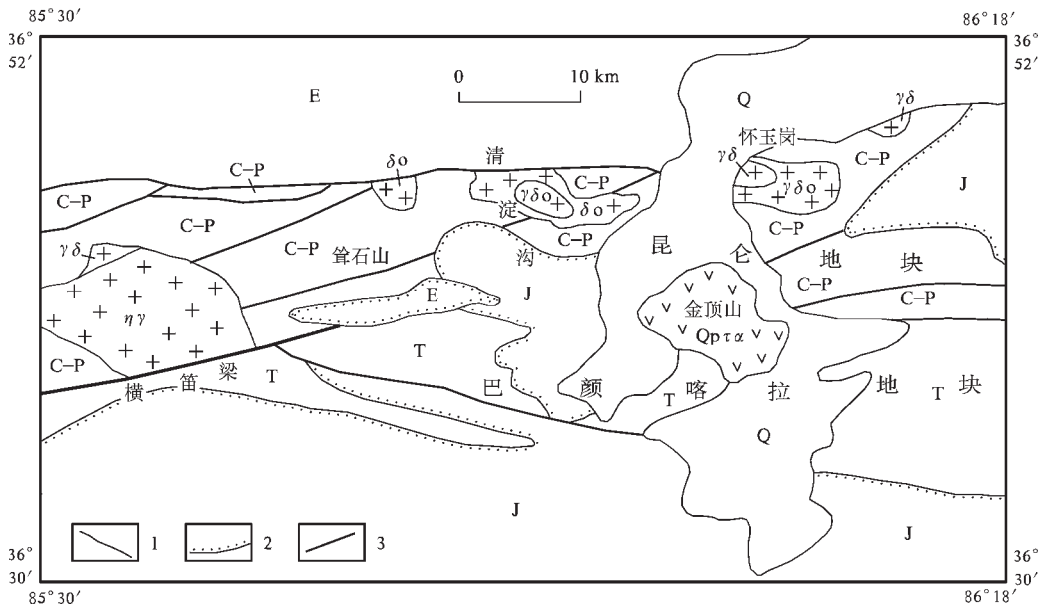


图 1 耸石山地区地质略图

E—古近纪地层;J—侏罗纪地层;T—三叠纪地层;C—P—石炭纪—二叠纪火山—沉积建造;Qpτα—更新世粗安岩;ηγ—二长花岗岩;γδ—花岗闪长岩;γδo—英云闪长岩;δo—石英闪长岩. 1—地质界线;2—角度不整合地质界线;3—断裂

Fig.1 Geological sketch map of the Songshishan area

E—Paleogene; J—Jurassic; T—Triassic; C—P—Carboniferous—Permian volcanic—sedimentary sequence; Qpτα—Pleistocene latite; ηγ—Monzogranite; γδ—Granodiorite; γδo—Tonalite; δo—Quartz diorite; 1—Geological boundary; 2—Unconformity; 3—Fault

①湖南地质调查院. 1:25 万银石山幅区域地质调查报告. 2003.

表 1 花岗岩锆石 U-Pb 模式年龄分析

Table 1 U-Pb data of zircons in granites

产地	岩性	元素含量 (10 ⁻⁹)		同位素比值及误差 (2σ)				表面年龄及误差 (Ma)		
		U	Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb
横笛梁	二长花岗岩	664.4	46.9	199.2	0.05350 ± 0.00017	0.39958 ± 0.01687	0.05416 ± 0.00229	336 ± 1.1	341 ± 14.4	377 ± 16
清淀沟	石英闪长岩	177	26.1	54.6	0.05191 ± 0.00074	0.40581 ± 0.07271	0.05669 ± 0.01019	326 ± 4.7	345 ± 61.9	479 ± 86.2

注:样品由宜昌地质矿产研究所同位素室分析。

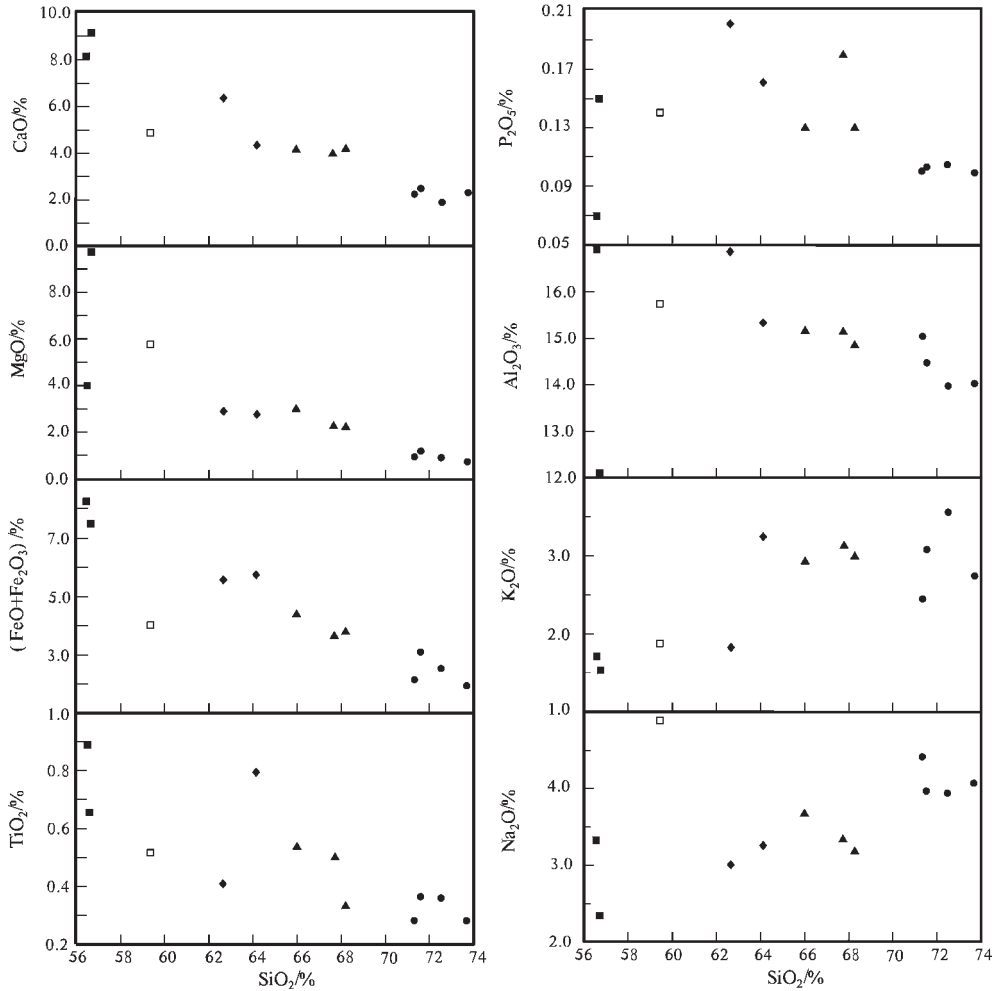


图 2 主要氧化物 Harker 图解

- 二长花岗岩; ▲—花岗闪长岩; ◆—英云闪长岩; ■—石英闪长岩; □—闪长质包体
- Monzogranite; ▲—Granodiorite; ◆—Tonalite; ■—Quartz diorite; □—Dioritic enclave

副矿物主要有磁铁矿、黄铁矿、磷灰石、锆石、榍石、绿帘石、褐帘石等,少量铁铝榴石、钛铁矿等。

花岗岩中发育的镁铁质暗色微粒包体多显示塑性流变特点,见较多针状磷灰石,说明包体是由岩浆混合作用形成。

对耸石山地区花岗岩挑选晶形很好的岩浆锆石进行 U-Pb 模式年龄测试(表 1)。由于年轻或 U-Pb 含量低的样

品,其 ²⁰⁷Pb/²³⁵U 以及 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 比值精度较差 [9],因此采用 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄,由此取得模式年龄 326 Ma 和 336 Ma,为早石炭世。鉴于岩体侵入于石炭纪—二叠纪沉积—火山岩中,该套岩系中的断裂和剪切带也未进入岩体中,且花岗岩中常有少量岩浆锆石是在继承性锆石外围增生而成,因此岩体的实际形成年代应当更晚,估计为二叠纪晚期。

表 2 花岗岩岩石化学成分(%)和微量元素丰度(10^{-6})Table 2 Petrochemical composition (%) and trace element contents (10^{-6}) of granites

岩性	包体	二长花岗岩				花岗闪长岩			英云闪长岩		石英闪长岩	
样号	812-1	812	昆-1	817	815-3	133-1	665	P3-45	225-3	664	225-2	1368
地点	横笛梁	横笛梁	横笛梁	横笛梁	横笛梁	怀玉岗	怀玉岗	横笛梁	清淀沟	清淀沟	清淀沟	清淀沟
SiO ₂	58.03	69.41	72.93	71.17	70.18	66.4	67.12	64.96	62.83	61.4	55.16	55.08
TiO ₂	0.50	0.27	0.28	0.35	0.36	0.49	0.32	0.53	0.77	0.40	0.63	0.87
Al ₂ O ₃	15.4	14.64	13.89	13.72	14.21	14.87	14.54	14.93	15.07	16.53	11.78	16.52
Fe ₂ O ₃	2.77	1.13	0.82	1.31	0.89	1.01	1.35	1.44	0.99	1.87	0.90	2.00
FeO	3.35	2.00	1.17	1.33	1.90	2.67	2.48	3.02	4.72	3.77	6.48	6.25
MnO	0.15	0.04	0.03	0.05	0.05	0.07	0.07	0.06	0.08	0.10	0.14	0.13
MgO	5.6	0.91	0.69	0.87	1.14	2.20	2.12	2.84	2.68	2.85	9.53	3.89
CaO	4.82	2.15	2.33	1.87	2.42	3.86	4.09	4.07	4.29	6.21	8.85	7.92
Na ₂ O	5.34	4.27	4.05	3.85	3.89	3.26	3.10	3.58	3.20	2.92	2.23	3.24
K ₂ O	1.64	2.38	2.68	3.49	3.04	3.07	2.93	2.86	3.17	1.76	1.49	1.66
P ₂ O ₅	0.14	0.10	0.09	0.14	0.13	0.18	0.13	0.13	0.16	0.20	0.15	0.07
灼失	1.45	1.59	0.73	1.07	1.23	1.55	1.34	1.27	1.58	1.56	1.97	1.88
总和	99.19	98.89	99.69	99.22	99.44	99.63	99.59	99.69	99.54	99.57	99.31	99.51
ASI	0.80	1.09	1.01	1.03	1.02	0.96	0.93	0.92	0.92	0.93	0.56	0.77
ANK	1.46	1.53	1.45	1.36	1.46	1.71	1.76	1.66	1.73	2.46	2.23	2.32
ALK	6.98	6.65	6.73	7.34	6.93	6.33	6.03	6.44	6.37	4.68	3.72	4.90
K ₂ O/Na ₂ O	0.31	0.56	0.66	0.91	0.78	0.94	0.95	0.80	0.99	0.60	0.67	0.51
A/MF	0.68	2.22	3.11	2.38	2.11	1.39	1.37	1.12	1.02	1.10	0.34	0.77
Sr	392	279	278	175	326	397	253	376	280	335	217	314
Ba	373	492	766	581	729	888	758	649	753	535	459	287
Th	4.8	10.6	7.3	18.8	16.9	9.6	16.4	8.8	8.3	6.9	4.1	5.2
U	1.2	2.0	0.9	1.5	2.2	5.8	1.8	0.8	2.1	1.8	0.9	1.7
Nb	2.9	3.6	4.9	11.6	9.5	12.8	12.5	9.1	16.1	10.4	9.9	13.4
Ta	0.5	0.5	0.5	1.0	1.1	0.9	1.0	0.7	0.6	1.0	1.0	1.1
Zr	95	129	128	209	143	279	207	184	189	188	93	63
Hf	3.7	3.5	3.9	5.9	4.4	8.7	6.6	5.5	6.0	5.6	3.7	2.8
Rb	80.3	88.3	63.3	126.8	95.2	97.7	95.5	114.0	111.7	54.5	34.8	69.1
Cs	11	9	16	11	6	10	12	15	13	14	14	14
La	19.32	22.93	20.81	23.36	23.80	16.95	18.94	22.44	21.01	16.87	10.97	17.50
Ce	32.74	36.73	32.12	44.98	39.73	35.99	36.54	41.33	43.33	38.68	30.22	42.38
Pr	3.73	4.02	3.35	4.69	4.45	3.72	4.33	4.89	5.45	4.77	3.70	3.32
Nd	12.61	13.28	10.98	14.79	15.20	15.44	13.10	17.63	19.86	16.52	13.92	21.28
Sm	2.52	2.20	1.55	2.69	2.61	3.01	3.23	3.35	4.14	3.58	3.09	4.84
Eu	0.70	0.54	0.49	0.63	0.63	0.75	0.70	0.76	0.89	0.88	0.76	1.00
Gd	2.03	1.54	1.05	1.97	2.01	2.56	2.82	2.93	4.07	3.03	3.50	4.63
Tb	0.32	0.22	0.13	0.30	0.29	0.42	0.44	0.42	0.70	0.46	0.61	0.81
Dy	1.80	1.09	0.64	1.63	1.55	2.34	2.44	2.40	3.85	2.71	3.50	5.20
Ho	0.35	0.20	0.12	0.31	0.29	0.48	0.51	0.51	0.83	0.54	0.75	1.36
Er	0.94	0.52	0.20	0.88	0.77	1.33	1.56	1.47	2.33	1.67	2.14	3.12
Tm	0.15	0.08	0.04	0.13	0.11	0.22	0.25	0.23	0.36	0.27	0.35	0.49
Yb	0.97	0.49	0.25	0.87	0.71	1.44	1.70	1.50	2.31	1.76	2.18	3.02
Lu	0.14	0.07	0.04	0.14	0.10	0.23	0.26	0.21	0.34	0.27	0.32	0.44
Y	8.92	5.94	3.38	8.35	7.35	12.75	14.56	13.85	21.72	15.63	19.32	28.34
ΣREE	87.24	89.85	75.15	105.72	99.60	97.63	101.39	113.92	131.19	107.65	95.33	137.73
ΣCe/ΣY	10.69	18.93	28.06	14.63	14.82	8.41	7.69	9.35	6.40	7.58	4.46	4.74
(La/Yb) _N	11.83	27.78	49.42	15.94	19.90	6.99	6.61	8.88	5.40	5.69	2.99	3.44
δEu	1.00	0.93	1.21	0.87	0.88	0.88	0.76	0.79	0.72	0.87	0.78	0.70
La/Sm	7.67	10.42	13.42	8.68	9.12	5.63	5.86	6.69	5.07	4.71	3.55	3.62

注:样品分析由湖北武汉综合岩矿测试中心完成。岩石化学成分采用 ICP-AES 分析,除 SiO₂ 采用碱溶法测定外,其他氧化物采用酸溶法测定,分析精度优于 2%。微量元素采用 PE Elan6000 型等离子体质谱测定(ICP-MS),除稀土元素与 Nb、Ta 采用碱溶法测定外,其他微量元素均采用酸溶法测定,分析精度优于 1%~3%。ASI=Al/(Ca-1.67P+Na+K)(分子比);ANK=Al/(Na+K)(分子比);ALK=Na₂O+K₂O; A/MF=Al₂O₃/(MgO+FeO)(分子比),FeO 为全铁。

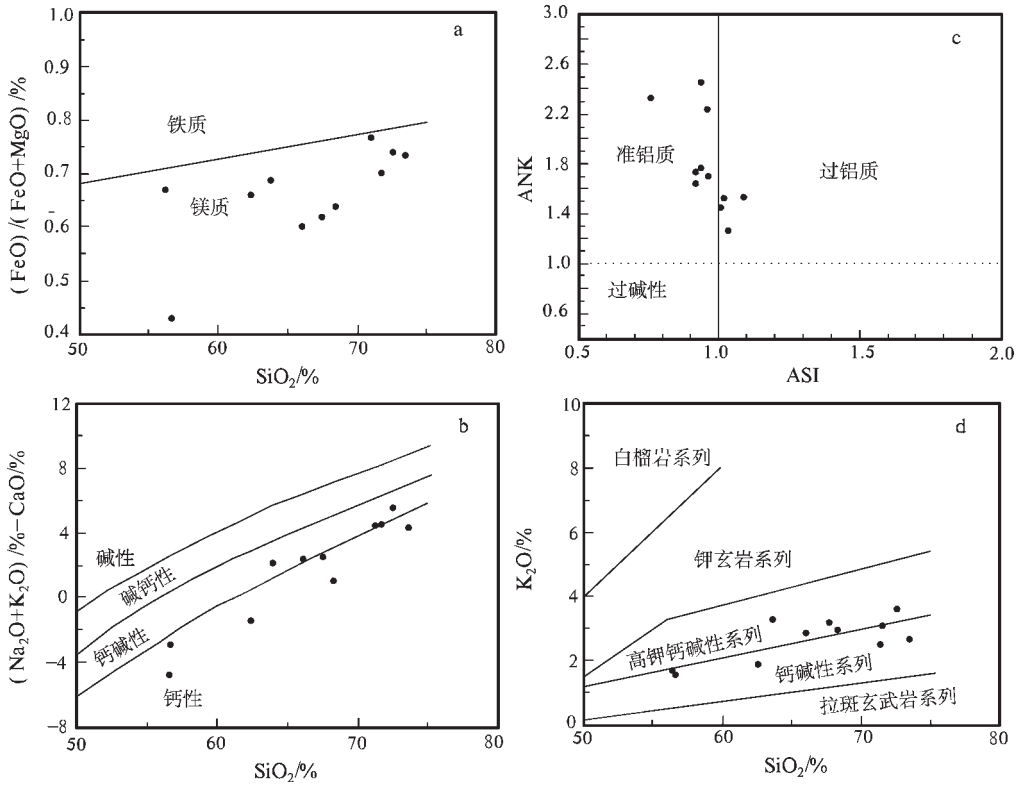


图3 花岗岩地球化学分类图解

a—c 据参考文献[10];d 据参考文献[11,12];a—c 显示花岗岩属镁质、钙性—钙碱性及准铝质—弱过铝质的花岗岩
图解 d 中,岩石属钙碱性—高钾钙碱性系列

Fig.3 Diagram of geochemical classification of granitoids.

a—c after reference [10];d after references [11, 12];a—c show that the granites are magnesian, calc-calc-alkaline and sub-aluminous-weakly peraluminous, The rocks are of calc-alkaline to high-K calc-alkaline series according to diagram d

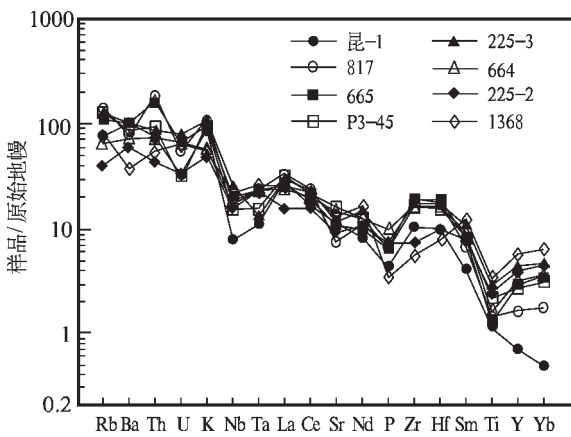


图4 花岗岩原始地幔标准化蛛网图

原始地幔数据引自 Wood(1979), 转引自李昌年^[13]

Fig.4 Primitive mantle-normalized trace element spidergram of granites

Primitive mantle data from Wood (1979), cited by Li Changnian^[13]

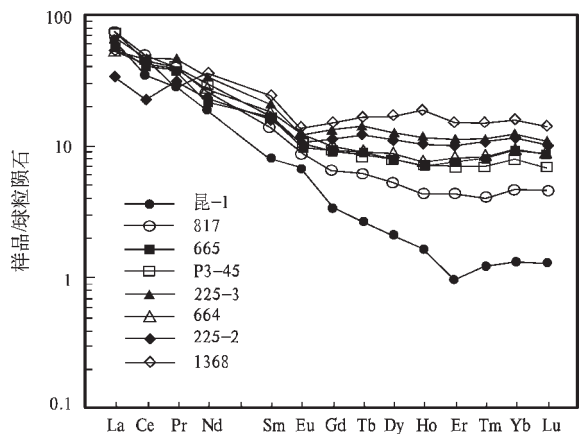


图5 花岗岩稀土元素配分模式图

球粒陨石数据据赫尔曼(1971), 转引自高秉璋等^[15]

Fig.5 Chondrite-normalized REE distribution patterns for granites.

Chondrite data from Herrman (1971), cited by Gao Bingzhang et al^[15]

3 地球化学特征

3.1 岩石化学特征

崑山地区石炭纪花岗岩 SiO_2 含量较低,为 56.42%~73.70%(无水化处理,以下同),平均为 66.44%。随着 SiO_2 含量的增加,TFeO、 TiO_2 、MgO、CaO 等均呈规律减少(表 2,图 2), Na_2O 和 K_2O 略呈增加趋势; Al_2O_3 和 P_2O_5 在英云闪长岩、石英闪长岩和二长花岗岩中总体减少,但在基性程度最高的石英闪长岩中含量反而偏低或较分散,暗示石炭纪花岗岩并非单一同源岩浆演化系列之产物。 Al_2O_3 含量较高,为 12.10%~16.92%,平均为 14.90%; K_2O 含量低,在 1.70%~3.56% 之间,平均含量为 2.64%; Na_2O 含量在 2.29%~4.39%,平均为 3.49%; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量较低,为 3.82%~7.48%,平均为 6.13%; K_2O 明显低于 Na_2O , $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值 0.51~0.99,平均为 0.76;TFeO 为 1.93%~8.25%,平均 4.47%; TiO_2 、MgO、CaO、 P_2O_5 含量较高,平均分别为 0.49%、2.76%、4.46%、0.14%。

Frost 等^[10]提出了花岗岩质岩石的新的分类方案,其依据是 3 个地球化学变量,即 $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$,这里“FeO”为 FeO 与 Fe_2O_3 之和(全铁),修改的碱钙指数($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$)以及铝饱和度(ASI)。根据这些参数以及 ANK,崑山地区石炭纪花岗岩属镁质、钙性—钙碱性(少量碱钙性)及准铝质—弱过铝质的花岗岩(图 3a—c)。在 Si—K 图中,岩石属钙碱性—高钾钙碱性系列。

3.2 微量元素与稀土元素特征

在不相容元素对原始地幔标准化蛛网图上(图 4),曲线位置较低,表明不相容元素富集程度总体不高。曲线明显右倾,相对富集大离子亲石元素。总体而言,与相邻元素相比, Ba、U、Nb、Ta、Sr、P、Ti 等表现为较明显但并不强烈的亏损,相反,Rb、Th、K、La、Nd、(Zr+Hf+Sm)、(Y+Yb) 等则相对富集,显示出它们未经历强烈的斜长石、磷灰石和钛铁矿等矿物的分离结晶作用。蛛网图特征与正常弧花岗岩质岩石基本一致^[11],暗示花岗岩的形成与岩浆弧环境有关。

稀土元素含量较低, ΣREE 为 75.15 $\mu\text{g}/\text{g}$ ~137.73 $\mu\text{g}/\text{g}$ (表 2),平均 105.01 $\mu\text{g}/\text{g}$; $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ 为 4.46~28.06,平均为 11.37, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 2.99~49.42,平均 13.91,显示轻稀土富集明显; δEu 值 0.70~1.21,平均为 0.85,显示出弱的负 Eu 异常或无负 Eu 异常,暗示经历了不太明显的斜长石的分离结晶作用,部分未经历斜长石分离结晶作用。轻稀土分配曲线明显向右倾斜(图 5),除二长花岗岩外,其他岩石的重稀土配分曲线则大多呈近水平状,反映出轻稀土元素部分具有明显的分馏,而重稀土元素部分分馏不明显。

4 岩浆作用与物质来源

如前所述,主量元素与微量元素特征表现为崑山地区晚古生代花岗岩不是单一同源岩浆演化的产物。Eu 微弱亏损或无亏损,且 δEu 值并未随岩石酸性程度增加而减小(表 2),也表明岩石并非受分异作用所控制的同源岩浆演化产

物。在主要氧化物 Harker 图解(图 2)中,英云闪长岩、花岗岩和二长花岗岩的成分点总体较连续,而石英闪长岩与英云闪长岩间则存在显著的成分间断,且 Al_2O_3 和 P_2O_5 在英云闪长岩、花岗岩和二长花岗岩中随 SiO_2 含量增加总体呈连续减少趋势,但石英闪长岩明显远离趋势线,说明石英闪长岩相对英云闪长岩、花岗岩和二长花岗岩等有着独立的岩浆和原岩来源。这一推断得到稀土元素特征的支持,基性程度最高的石英闪长岩的 δEu 值最低(表 2),充分说明与其他 3 类花岗质岩石不是同源岩浆分异结晶演化关系。而就英云闪长岩、花岗岩和二长花岗岩等 3 种岩石而言,酸性程度最高的二长花岗岩却有着最高的 δEu 值(表 2),且稀土分配曲线斜率最陡(图 5),说明与英云闪长岩和花岗岩间不是同源岩浆分异演化关系。因为在结晶分异的正向演化条件下,后期岩浆 Eu 更加亏损,且后期岩浆重稀土常会相对富集,如湘南金鸡岭复式花岗岩体^[16]。总之,相对英云闪长岩与花岗岩而言,石英闪长岩和二长花岗岩各有其独立的岩浆来源。

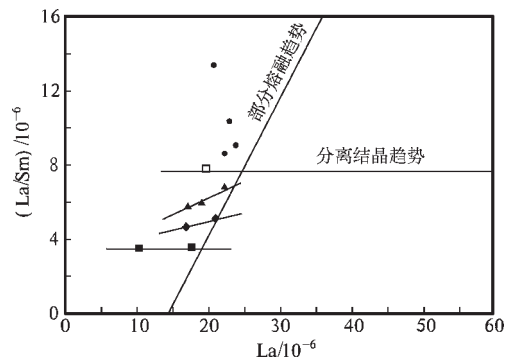


图 6 花岗岩 La/Sm—La 图解

●—二长花岗岩;▲—花岗岩闪长岩;◆—英云闪长岩;
■—石英闪长岩;□—闪长质包体

Fig.6 La/Sm—La diagram for granites

●—Monzogranite;▲—Granodiorite;◆—Tonalite;
■—Quartz diorite;□—Dioritic enclave

在 La/Sm—La 图解中(图 6),石英闪长岩的两个样品组成一条近水平直线,说明其岩浆形成明显受结晶分异作用所控制;其相对较低的 δEu 值(分别为 0.70 和 0.78)亦表明岩浆很可能经历了斜长石的结晶分离作用。

英云闪长岩和花岗岩闪长岩的分析样品分别组成缓倾斜直线,暗示岩浆均同时受部分熔融和分离结晶作用所控制(图 6)。花岗岩闪长岩总体位于英云闪长岩上方略偏右,表明二者非结晶分异演化关系,而是来源于不同岩浆房,但其初始岩浆很可能为相同原岩经不同程度部分熔融所形成。

二长花岗岩样品点散乱(图 6),未显示分离结晶趋势,也未构成部分熔融趋势,推断存在岩浆混合作用或可能与流体作用有关,结合岩浆成因镁铁质微粒包体发育来看,岩浆混合作用的可能性更大。鉴于微粒包体的 δEu 值达 1.0(表

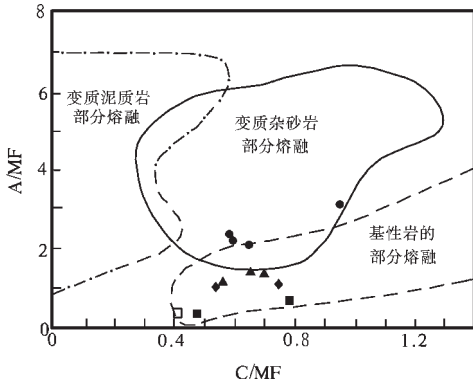


图7 花岗岩 C/MF-A/MF 图解^[19]

●—二长花岗岩; ▲—花岗闪长岩; ◆—英云闪长岩;
 ■—石英闪长岩; □—闪长质包体

Fig.7 C/MF-A/MF diagram of granites^[19]

●—Monzogranite; ▲—Granodiorite; ◆—Tonalite; ■—Quartz diorite;
 □—Dioritic enclave

2), 推测二长花岗岩的高 δEu 值可能也与幔源基性岩浆的混合^[17]有一定关系。由此可见, 昆仑造山带花岗岩的岩浆混合作用除三叠纪^[17,18]外, 晚古生代同样存在。

在 C/MF-A/MF 图解 (C 为 CaO , MF 为 $MgO + TFeO$, A 为 Al_2O_3 , 均为分子数)(图 7)中, 二长花岗岩落入变质杂砂岩区, 而石英闪长岩、英云闪长岩及花岗闪长岩则落入基性岩区, 说明二长花岗岩主要来源于片岩、片麻岩等酸性岩石的重熔(据前述还有幔源物质加入), 而石英闪长岩、英云闪长岩及花岗闪长岩可能来源于地壳深部玄武质源区岩石。以往的研究表明^[20], 无负 Eu 异常的中酸性火成岩标志着加厚陆壳的存在, 其形成于加厚陆壳的底部或造山带山根的底部。因此, 上述崑山地区石炭纪花岗岩具弱的负 Eu 异常或无负 Eu 异常, 也说明岩体形成深度可能较大。值得指出的是, 鉴于地壳一般具上部为酸性岩石、下部为基性岩石的结构特征, 而幔源基性岩浆的混合及无负 Eu 异常等表明崑石

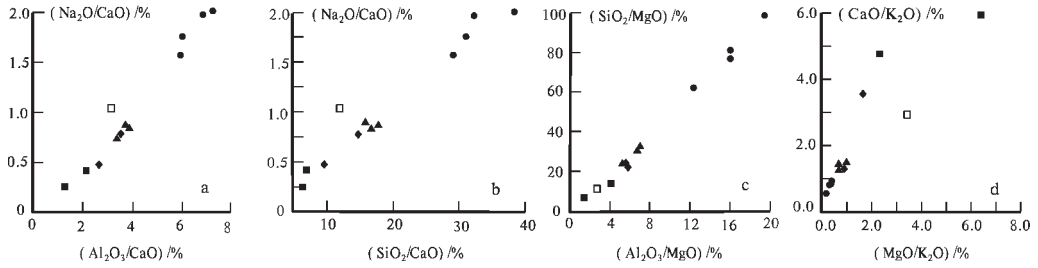


图8 花岗岩氧化物比值 Harker 图解

●—二长花岗岩; ▲—花岗闪长岩; ◆—英云闪长岩; ■—石英闪长岩; □—闪长质包体

Fig.8 Harker diagrams of the ratios of oxides in granites

●—Monzogranite; ▲—Granodiorite; ◆—Tonalite; ■—Quartz diorite; □—Dioritic enclave

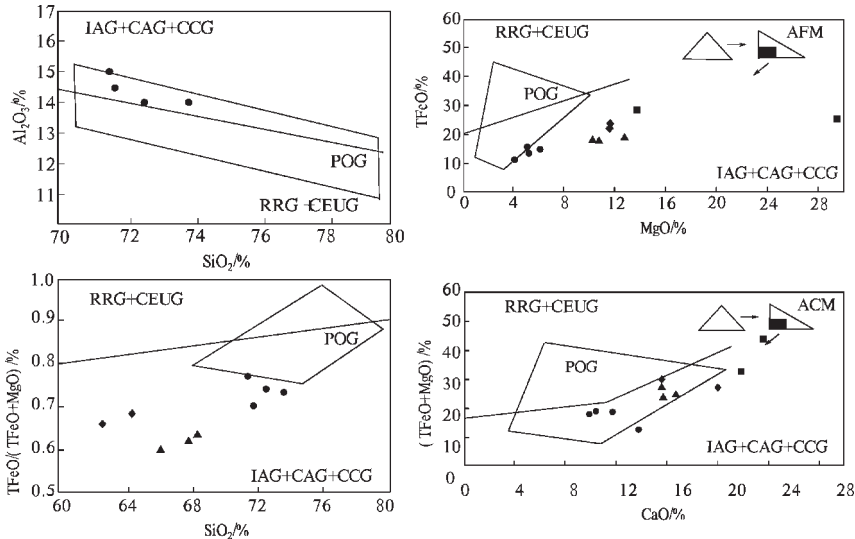


图9 花岗岩形成的构造环境判别图^[22]

IAG—岛弧花岗岩; RRG—与裂谷有关的花岗岩; CAG—大陆弧花岗岩类; CEUG—大陆的造陆抬升花岗岩类; CCG—大陆碰撞花岗岩类; POG—后造山花岗岩类; ●—二长花岗岩; ▲—花岗闪长岩; ◆—英云闪长岩; ■—石英闪长岩; □—闪长质包体

Fig.9 Diagrams for tectonic environment discrimination of granites^[22]

IAG—Island-arc granite; RRG—Granite related to rift; CAG—Continental arc granite; CEUG—Continental epirogenetic uplift granite; CCG—Continental collision granite; POG—Post-orogenic granite; ●—Monzogranite; ▲—Granodiorite; ◆—Tonalite; ■—Quartz diorite; □—Dioritic enclave

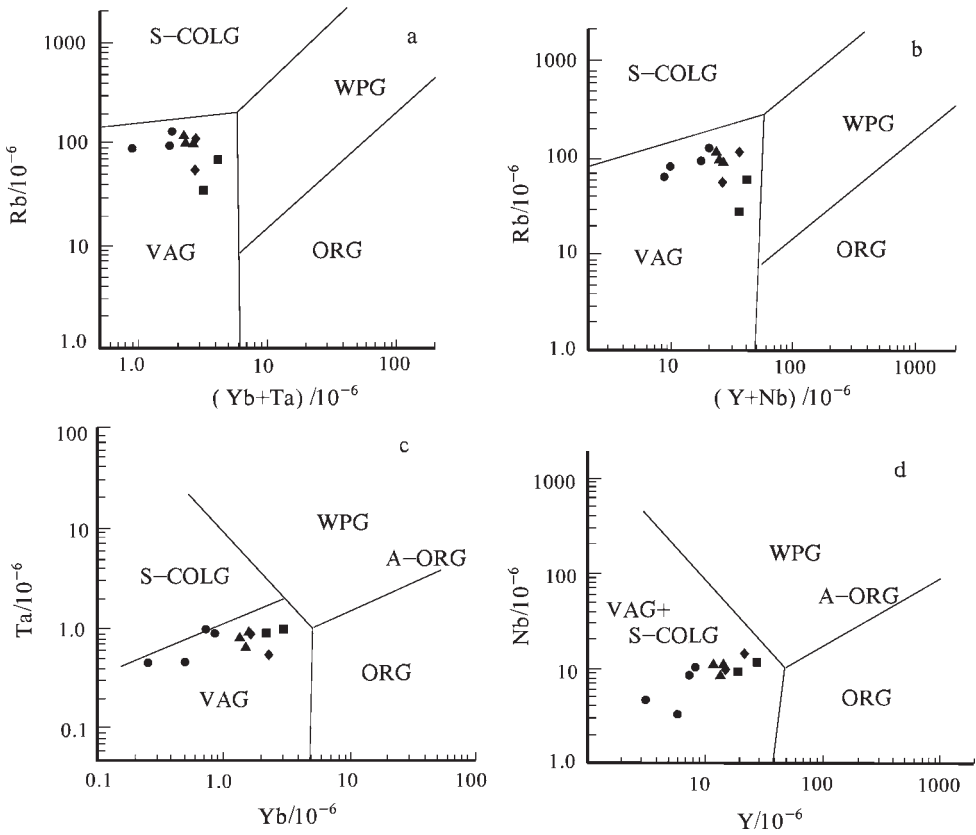


图 10 花岗岩微量元素构造环境判别图解^[24]

VAG—火山弧花岗岩; WPG—板内花岗岩; S-COLG—同碰撞花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩; A-ORG—异常洋中脊花岗岩

●—二长花岗岩; ▲—花岗闪长岩; ◆—英云闪长岩; ■—石英闪长岩; □—闪长质包体

Fig.10 Trace element diagrams for tectonic environment discrimination of granites^[24]

VAG—Volcanic-arc granite; WPG—Within-plate granite; S-COLG—Syn-collision granite; ORG—Oceanic ridge granite

A-ORG—Abnormal oceanic ridge granite. ●—Monzogranite; ▲—Granodiorite; ◆—Tonalite; ■—Quartz diorite; □—Dioritic enclave

山地区源于变质酸性岩的二长花岗岩来源于地壳深部或底部,一定程度上反映出造山带地壳结构的复杂性。

在多种同分母的氧化物比值相关图(图 8)中,石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩的所有样品,未能在各图中一致显示出高度相关的线性关系,也未构成双曲线趋势,亦表明岩浆具有 2 个以上的多来源。因为同源岩浆分离结晶作用过程的演化线多为双曲线,二元岩浆混合作用则构成直线^[21]。值得指出的是,尽管横笛梁岩体二长花岗岩中含岩浆混合成因微粒包体,但在图 8 中二长花岗岩与包体间并未构成直线,也反映出寄主岩(二长花岗岩)具多源岩浆混合特征。

综上所述,耸石山地区晚中生代花岗岩原岩有变质杂砂岩、玄武质岩石及少量地幔岩等多种类型,并属多个岩浆源位产物,反映出造山带结构的复杂性和物质组成的多样性。

5 构造环境

在 Maniar 等^[24]提出的多组主元素构造环境判别图解中,所有样品在各图解中均落入 IAG+CAG+CCG 区(图 9)一

侧,且一般位于与 POG 重叠区之外,因此应属于 IAG+CAG+CCG 组类型。其 ASI 值 0.56~1.09,远小于 1.15,因而可进一步判断为岛弧和大陆弧花岗岩类(IAG+CAG)(CCG 的 ASI 值大于 1.15)^[23]。以 Pearce et al^[24]多组微量元素构造环境判别图解(图 10)进行判别,所有样品也一致位于火山弧区。

从区域上看,昆仑山中段北面托库孜达坂一带发育石炭纪岛弧火山岩^[25],在其南面阿克塔格山南坡发育石炭纪蛇绿混杂岩,研究表明该蛇绿岩形成于大陆边缘盆地环境^[26],再往南为耸石山地区混杂岩带。因此,晚古生代昆仑山中段自北往南应存在大陆边缘弧—弧后盆地—岛弧的构造格局,位于南面的耸石山地区应为岛弧—弧前增生楔位置。

综上所述,主量元素与微量元素构造环境地球化学判别均明确表明耸石山地区晚古生代花岗岩形成于岛弧或大陆弧构造环境,据区域构造岩相格局可进一步确定为岛弧环境。

6 结论

(1)昆仑山中段耸石山地区晚古生代花岗岩由石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩等 4 类岩石组成,

总体属钙质、准铝质—弱过铝质钙性—钙碱性花岗岩,为多种原岩与岩浆来源产物,反映出造山带结构的复杂性。花岗岩形成过程中具岩浆混合作用。

(2)微量元素蛛网图特征,氧化物与微量元素构造环境判别图解以及区域构造格局等,表明花岗岩形成于岛弧环境。

参考文献 (References):

- [1] 潘裕生. 昆仑山区构造区划初探[J]. 自然资源学报, 1989,4(3):12~16.
Pan Yusheng. A preliminary study on the regionalization of the structures in the Kunlun Mountains region [J]. Journal of Natural Resources, 1989,4(3):12~16(in Chinese with English abstract).
- [2] 潘裕生. 西昆仑山构造特征及演化[J]. 地质科学, 1992,25(3):23~27.
Pan Yusheng. The tectonics character and evolution of the western Kunlun [J]. Chinese Journal of Geology, 1992,25 (3):23~27 (in Chinese with English abstract).
- [3] 潘裕生. 喀喇昆仑山—昆仑山地区地质演化[M]. 北京:科学出版社, 2000.
Pan Yusheng. Geological evolution of the Karakorum—Kunlun Mountains[M]. Beijing: Science Press, 2000(in Chinese).
- [4] 姜春发, 杨经绥, 冯秉贵. 昆仑开合构造[M]. 北京:地质出版社, 1992.
Jiang Chunfa, Yang Jingsui, Feng Binggui. Opening—closing tectonics of Kunlun Mountains [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992(in Chinese).
- [5] 殷鸿福, 张克信. 东昆仑造山带的一些特点[J]. 地球科学, 1997,22(4):339~342.
Yin Hongfu, Zhang Kexin. Characteristics of the eastern Kunlun orogenic belt. Earth Sciences, 1997,22 (4):339~342 (in Chinese with English abstract).
- [6] 许靖华, 孙枢, 王清晨. 中国大地构造相图[M]. 北京:科学出版社, 1998.
Xu Jinghua, Sun Shu, Wang Qingchen. Tectonic facies map of China[M]. Beijing: Science Press, 1998(in Chinese).
- [7] 尹福光, 潘桂棠, 李兴振. 昆仑多岛弧盆系及泛华夏大陆的增生[J]. 大地构造与成矿学, 2003,27(1):22~27.
Yin Fuguang, Pan Guitang, Li Xingzhen. Multi—arc—basin system of kunlun orogenic belt and the pan—Cathaysian continental accretion [J]. Geotectonics et Metallogenia, 2003,27 (1):22~27 (in Chinese with English abstract).
- [8] 陈必河, 刘耀荣, 肖冬贵, 等. 藏北高原金顶山第四纪火山岩特征及构造环境[J]. 岩石矿物学杂志, 2003,22(2):125~130.
Chen Bihe, Liu Yaorong, Xiao Donggui, et al. Characteristics and tectonic environments of Quaternary volcanic rocks in Jindingshan, North Tibet Plateau [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2003,22 (2):125~130(in Chinese with English abstract).
- [9] 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U—Pb 年龄测定与稀土元素成分分析 [J]. 科学通报, 2003,48(14):1511~1520.
Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, et al. Determination of U—Pb age and rare earth element concentrations of zircons from Cenozoic intrusions in northeastern China by laser ablation ICP—MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2003,48(22):2411~2421.
- [10] Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. A geochemical classification for granitic rocks [J]. Journal of Petrology, 2001,42 (11): 2033~2048.
- [11] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc—alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. Contrib. Mineral. Petrol. 1976,58(1):63~81.
- [12] Wheller G E, Varne R, Foden J D, et al. Geochemistry of Quaternary volcanism in the Sunda—Banda arc, Indonesia, and three—component genesis of island—arc basaltic magmas [J]. J Volcan Geotherm Res, 1987,32:137~160.
- [13] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1992.179.
Li Changnian. Trace Element Lithology of Magmatic Rock [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1992.179(in Chinese).
- [14] Poli G, Ghezzo C, Conticelli S. Geochemistry of granitic rocks from the Hercynian Sardinia—Corsica batholith: implication for magma genesis[J]. Lithos, 1989,23:247~266.
- [15] 高秉璋, 洪大卫, 郑基俭, 等. 花岗岩类 1:5 万区域地质填图方法指南[M]. 北京:中国地质大学出版社, 1991.33.
Gao Binzhang, Hong Dawei, Zheng Jijian, et al. A guide to the method of the 1:50000 regional geological survey in igneous granide areas [M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1991.33(in Chinese with English abstract).
- [16] 汪传胜, 汪相, 姚晓娟. 南岭中西段若干复式花岗岩体的成因模式研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2004,23(3):204~213.
Wang Chuansheng, Wang Xiang, Yao Xiaojuan. Petrogenetic models of the composite granitic plutons in the mid—western Nanling Region [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2004,23(3): 204~213(in Chinese with English abstract).
- [17] 湛宏伟, 罗照华, 莫宣学, 等. 东昆仑造山带三叠纪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):386~395.
Chen Hongwei, Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, et al. Underplating mechanism of Triassic granite of magma mixing origin in the East Kunlun orogenic belt[J]. Geology in China, 2005,32(3):386~395(in Chinese with English abstract).
- [18] 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.
Liu Chengdong, Zhang Wenqin, Mo Xuanxue, et al. Features and origin of mafic microgranular enclaves in the Yuegelu granite in the eastern Kunlun [J]. Geological Bulletin of China, 2002,21(11): 739~744 (in Chinese with English abstract).
- [19] Alther R, Holl A, Hegner E, et al. High—potassium, calc—alkaline I—type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany)[J]. Lithos, 2000,50: 51~73.
- [20] 邓晋福, 赵海玲, 赖绍聪, 等. 白云母/二云母花岗岩形成与陆内俯冲作用[J]. 地球科学, 1994,19(2):139~147.
Deng Jinfu, Zhao Hailing, Lai Shaocong, et al. Generation of muscovite/two—mica granite and intracontinental subduction [J]. Earth Science, 1994,19(2):139~147(in Chinese with English abstract).
- [21] 周珣若. 花岗岩混合作用[J]. 地学前缘, 1994,1(1~2):97~97.

- Zhou Xunruo. Hybridization in the genesis of granitoids [J]. Earth Science Frontiers, 1994,1(1~2):97~97(in Chinese with English abstract).
- [22] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geol Soc Am Bull, 1989,101:635~643.
- [23] 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京:地质出版社, 2002.21~36.
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, et al. The Ways of Investigation on Granitoids [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2002.21~36 (in Chinese).
- [24] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. J Petrol, 1984,25(4):956~983.
- [25] 王先辉, 丁正兴, 马铁球. 东昆仑西段托库孜达坂群中组火山岩岩石地球化学特征及构造环境分析 [J]. 华南地质与矿产, 2004, (4):9~14.
- Wang Xianhui, Ding Zhengxing, Ma Tieqiu. Petrochemical characteristics and tectonic setting of volcanic rocks from Tokuzidaban Group in eastern Kunlunmountains [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2004,(4):9~14(in Chinese with English abstract).
- [26] 尹福光, 潘桂棠, 李兴振, 等. 昆仑造山带中段蛇绿混杂岩的地质地球化学特征[J]. 大地构造与成矿学, 2004,28(2):194~200.
- Yin Fuguang, Pan Guitang, Li Xingzhen, et al. Geological and geochemical characteristics of the ophiolite complex in the central section of the Kunlun Mountains [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2004,28(2):194~200(in Chinese with English abstract).

Geochemical characteristics, rock-forming processes and tectonic setting of Late Paleozoic granites in the Songshishan area, Central Kunlun Mountains

BAI Dao-yuan, CHEN Bi-he, MENG De-bao, LIU Wei

(Hunan Institute of Geology Survey, Xiangtan 411100, Hunan, China)

Abstract: The Late Paleozoic granites occurring in the Songshishan area, Central Kunlun Mountains are composed of quartz diorite, tonalite, granodiorite and monzogranite. The rocks have low contents of SiO_2 (56.42%–73.70%) and K_2O (1.70%–3.56%) and are poor in alkalis with $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=6.13\%$ on average and rich in sodium with $\text{Na}_2\text{O}=3.49\%$ on average and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=0.51-0.99$ and aluminium with $\text{Al}_2\text{O}_3=14.90\%$ on average. The granites as a whole are of magnesian, sub-aluminous-weakly peraluminous calc-calc-alkaline series. Ba, U, Nb, Ta, Sr, P and Ti are pronounced but not strongly depleted, while Rb, Th, K, La, Nd, (Zr+Hf+Sm) and (Y+Yb) are comparatively concentrated. ΣREE values average $105\mu\text{g/g}$ and LREE values are enriched with $(\text{La}/\text{Yb})\text{N}=13.91$ on average. δEu values are weakly depleted or show no depletion, with $\delta\text{Eu}=0.85$ on average. Quartz diorite is notably deviated from the evolution line in the Harker diagram of main oxides and has the lowest δEu values, monzogranite has the highest δEu values, the data points of the rocks fall in different fields of the C/MF–A/MF diagram, the oxide variation curves neither show straight lines nor form hyperbolas on the syn-denominator diagrams, the 4 types of granites do not show the trend of differentiation in the La/Sm–La diagram, and there are mafic microgranular enclaves of magma mingling origin in granites—all these suggest that the parent rocks and magma of the granites have multiple sources and that magma mixing occurred during the formation of the magma. The characteristics of the trace element spidergram, various oxide and trace element diagrams for tectonic environment discrimination and regional tectonic framework reveal that the rocks were formed in an island–arc environment.

Key words: granite; geochemical characteristics; rock-forming processes; island–arc environment; Songshishan; Central Kunlun Mountains

About the first author: BAI Dao-yuan, male, born in 1967, senior engineer, main research interests are on tectonics and petrology; E-mail: daoyuanbai@sina.com.