DOI：10. 12090/j. issn. 1006 – 6616. 2018. 24. 05. 066
文章编号：1006-6616（2018）05-0661-09

新疆库地南苏盖提力克晚志留世花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及大地构造意义

专少鹏，白春东，毛志芳，李　典，张新征，陈圆圆，连　青
（河北省区域地质调查院，河北 廊坊 065000）

摘　要：西昆仑地区早古生代原特提斯洋的后碰撞阶段划分存在分歧，通过对库地蛇绿岩南侧苏盖提力克花岗岩开展区域地质调查、岩石学、地球化学、锆石 U-Pb 年代学等方面研究，从而为原特提斯洋构造演化及闭合时限提供地质依据。研究表明，苏盖提力克花岗岩锆石 U-Pb 年龄（LA-ICP-MS）为（422.5 ± 2.5）Ma，属于晚志留世岩浆活动产物。苏盖提力克花岗岩含有典型矿物白云母，A/CNK = 1.07 ~ 1.11，刚玉分子含量为 1.07% ~ 1.56%，属于 S 型花岗岩。地球化学上，该岩体富硅、碱，贫钙、镁，富 K、Rb、Nb、Th，贫 Sr、Ti、P，Rb/Sr 比值高；结合区域地质背景及地球化学特征综合分析表明，苏盖提力克花岗岩是原特提斯洋闭合后碰撞阶段的产物，因而晚志留世是原特提斯洋由消减闭合到陆陆碰撞—碰撞后伸展转换时期。

关键词：西昆仑；原特提斯洋；锆石 U-Pb 年龄；晚志留世；S 型花岗岩
中图分类号：P588. 12　　**文献标识码：**A

ZIRCON U-Pb AGES AND GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE SUGAITILIKE LATE SILURIAN GRANITES IN SOUTHERN KUDI, XINJIANG AND ITS GEOTECTONIC SIGNIFICANCE

ZHUAN Shaopeng, BAI Chundong, MAO Zhifang, LI Dian, ZHANG Xinzheng,
CHEN Yuanyuan, LIAN Qing
(*Hebei Institute of Regional Geological Survey*, *Langfang* 065000, *Hebei*, *China*)

Abstract: There are different opinions about the division of post-collisional stages of the Early Paleozoic Proto-Tethys Ocean in the West Kunlun area. In this paper, researches including regional geological survey, petrology, geochemistry, zircon U-Pb chronology, etc. were carried out on Sugaitilike granites, south side of Kudi ophiolite, which provide a geological basis for the tectonic evolution and closing time limit of the Proto-Tethys Ocean. The results show that, the age of zircon U-Pb (LA-ICP-MS) is 422.5 ± 2.5 Ma, making granites products of the late Silurian magma activities. Sugaitilike granite contains typical mineral muscovite, A/CNK = 1.07 ~ 1.11, and the content of corundum is 1.07 ~ 1.56%, belonging to S-type granite. Geochemically, the rock body is rich in silicon, alkali, calcium-depleted, magnesium-rich, rich in K, Rb, Nb, Th, lean in Sr, Ti, P, and high in Rb/Sr ratio. The comprehensive analysis of the geological background and geochemical characteristics of the Sugeitik granite area shows that granites are the products of the collision phase of the Proto-Tethys Ocean. Therefore, the late Silurian is the transition period from the closing of the Proto-Tethys Ocean to the

基金项目：新疆维吾尔自治区地质勘查基金项目（XJDKJJZ2011-4）
作者简介：专少鹏（1979-），男，硕士，副高级工程师，主要从事区域地质矿产调查与研究工作。E-mail：825801653@ qq. com
收稿日期：2018-04-12；**修回日期：**2018-07-30　　范二平编辑

collision of land and land-the period of post-collisional extension transformation.

Key words: west Kunlun area; Proto-Tethys Ocean; zircon U-Pb age; Late Silurian granite; S-type granite

0 引言

塔里木盆地西南缘的西昆仑地区构造演化是地质学家十分关注的问题，古生代该地区经历了拉张—闭合—再拉张—再闭合两个构造演化阶段。柯岗—库地蛇绿岩带是加里东时期原特提斯构造域的地质表现，由于后期构造叠加、地理交通因素和地质工作程度的限制，西昆仑地区早古生代构造演化的细节不甚清楚，原特提斯洋闭合及碰撞时限不明。王元龙等[1]认为志留纪（440～410 Ma）是原特提斯洋闭合阶段；周辉等[2]研究库地煌斑岩认为404 Ma时期西昆仑构造演化转变为热隆引张的构造环境；肖序常[3]等认为原特提斯洋在古生代早期已消减闭合；郝杰等[4]认为库地超镁铁质岩构造侵位，围岩变形及变质等均发生在早古生代早期；袁超等[5]研究库地128岩体认为原特提斯洋在（471±5）Ma时期仍处于俯冲消减阶段；崔建堂等[6]认为康西瓦北侧蒙古包—普守蛇绿混杂岩的汇聚俯冲时间早于晚奥陶世；黄建国等[7]认为原特提斯洋在中奥陶世—志留纪处于消减的末期；高晓峰等[8]获得大同岩体锆石U-Pb年龄为（470.0±1.2）Ma，认为其为原特提斯洋在早奥陶世俯冲消减—碰撞过程中的产物；王超等[9]在西昆仑库地蛇绿岩北部侵入柯岗断裂的布隆二长花岗岩获得锆石U-Pb年龄（441±2）Ma，时代为早志留世，认为其是原特提斯洋俯冲的产物；黄朝阳等[10]认为奥陶纪末期原特提斯洋两侧大陆碰撞，形成同碰撞花岗岩。

已有研究对西昆仑原特提斯洋在早古生代晚期构造演化存在不同认识，具体可以概括为以下几个观点：①早奥陶世—志留纪时期原特提斯洋处于消减闭合阶段[1,4~6,8~9]；②奥陶纪末期原特提斯洋两侧大陆碰撞[10]；③早泥盆世西昆仑处于碰撞后伸展环境[2]。西昆仑库地一带发育志留纪二长花岗岩，通过对库地南志留纪苏盖提力克花岗岩开展锆石年代学、岩石地球化学研究，确定其成因类型，代表的构造环境，进而为该区早古生代原特提斯洋构造演化及闭合时限提供地质依据。

1 区域地质背景

新疆库地南一带横跨北昆仑古生代复合沟弧带和中昆仑地块及早古生代柯岗—库地缝合带，柯岗—库地缝合带东西向贯穿研究区，是研究早古生代原特提斯洋构造演化的有利地段。库地缝合带南侧发育中昆仑地块基底新元古代赛图拉岩群、新元古代堇青二长花岗岩、奥陶纪花岗岩、志留纪花岗岩和印支期花岗岩；缝合带北侧发育早古生代库地构造混杂岩和库地蛇绿岩和印支期二长花岗岩[11]。

赛图拉岩群岩性为片麻岩、浅粒岩、变粒岩、片岩和斜长角闪岩，局部变质程度达高角闪岩相，混合岩化作用强烈；堇青二长花岗岩侵入赛图拉岩群；早古生代库地构造混杂岩为构造片岩，是原特提斯洋俯冲碰撞过程的强烈的剪切和挤压作用下，发生动力变质变形而成，苏盖提力克花岗岩侵入新元古界赛图拉岩群和堇青二长花岗岩（见图1）[11]。

2 岩体地质及岩石学特征

苏盖提力克花岗岩出露于库地缝合带南侧，岩性为中细粒二长花岗岩，侵入新元古代赛图拉岩群和新元古代片麻状堇青二长花岗岩及奥陶纪片麻状中粒二长花岗岩之中，同时被三叠纪二长花岗岩侵入。苏盖提力克花岗岩与赛图拉岩群侵入接触面近于直立，接触面截切片麻理；侵入接触带花岗岩具混染特征，呈浅灰绿色，混染带宽约10 m，岩体边部粒度较细。

岩石呈深灰色，中细粒花岗结构，块状构造。岩石由斜长石、钾长石、石英、黑云母、白云母组成。斜长石呈半自形板状，粒度一般0.1～2.0 mm，少量为2.0～2.5 mm；少见环带构造，含量40%～45%。钾长石呈它形粒状，少部分呈半自形宽板状，粒度一般0.1～2.0 mm，少量为2.0～2.5 mm；晶内嵌布少量斜长石、石英等小包体，局部交代斜长石，含量25～30%。石英呈它形粒状，不均匀分布，粒度一般0.1～1.0 mm；粒内可见轻波状消光，边界呈不规则状接触，含量

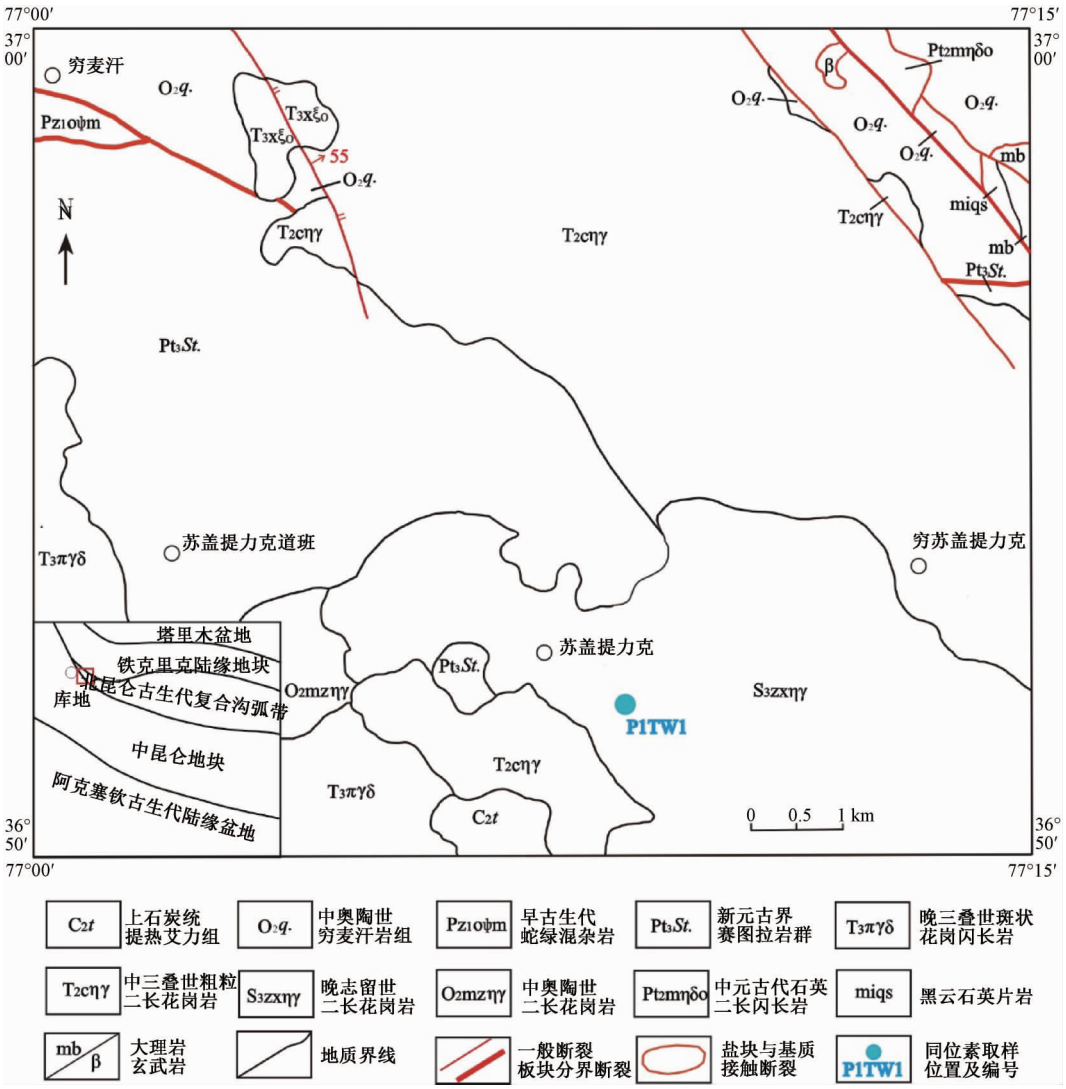
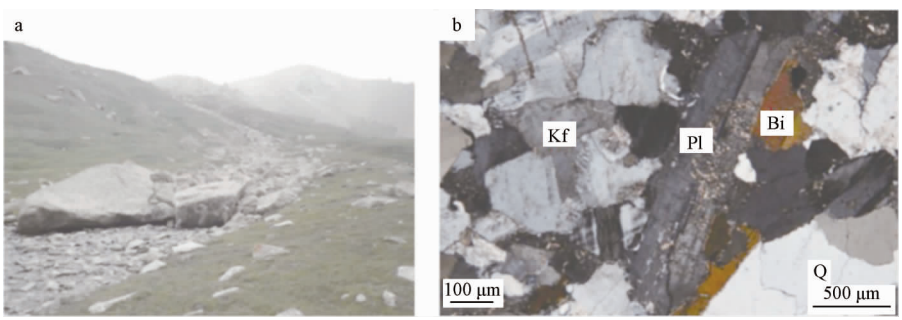


图 1　库地地区的地质简图[11]

Fig. 1　Simplified geological map of Kudi area[11]

20%左右。黑云母、白云母呈细小叶片状，杂乱分布，粒度一般 0.1 ~ 0.5 mm；黑云母不均匀绿泥石化等，局部呈假象产出，副矿物有锆石、磷灰石、独居石、磷钇矿等（见图 2）。



Kf—钾长石；Pl—斜长石；Bi—黑云母；Q—石英

a—野外露头；b—显微结构

图 2　苏盖提力克花岗岩野外和显微结构照片

Fig. 2　Field and microstructure photographs of Sugaitilike granite

3 样品采集、锆石分选及分析方法

3.1 样品采集

通过对苏盖提力克一带进行系统野外调查，在中细粒二长花岗岩中共采集6件岩石地球化学样品和1件锆石U-Pb样品。其中锆石U-Pb样品采自苏盖提力克附近（见图1，地理坐标36°41′59″N，77°08′52″E），原岩重3.73 kg，用于岩浆锆石的LA-ICP-MS定年测试。

3.2 分析方法

岩石地球化学分析测试由河北省区域地质矿产调查研究所实验室测试完成，主量元素采用碱熔法制备样品，使用Axios^{max}X射线荧光光谱仪完成分析测试，分析精度高于5%，烧蚀量、H_2O^+和H_2O^-采用P1245电子分析天平完成测试。微量元素和稀土元素采用酸溶法制备样品，使用X Serise 2等离子体质谱仪完成测试，分析精度高于5%。

用于锆石U-Pb测年样品由河北省区域地质矿产调查研究所实验室分选锆石单矿物。在双目镜下根据锆石颜色、自形程度、形态等特征初步分类，挑选出具有代表性的锆石，将待测锆石与标准锆石样品制作成环氧树脂样品靶，待样品靶固结、干燥后，进行打磨并抛光至大多数锆石颗粒中心暴露，然后拍摄可见光和阴极发光显微照片，测试时根据显微照片选取测点部位，力求避开裂隙和包裹体，以使获得的年龄值有较确切的地质意义。

锆石U-Th-Pb同位素测定在天津地质调查中心同位素实验室的LA-MC-ICP-MS上完成，测定结果中的同位素比值和年龄误差为1σ水平，使用的仪器及分析流程详见参考文献［10～14］。

4 分析结果

4.1 LA-ICP-MS锆石U-Pb分析结果

中细粒二长花岗岩锆石主要为自形半自形柱状，从阴极发光（CL）图像（见图3）可以看出锆石具有清晰的内部结构和典型岩浆成因的震荡环带，表明锆石是岩浆成因。

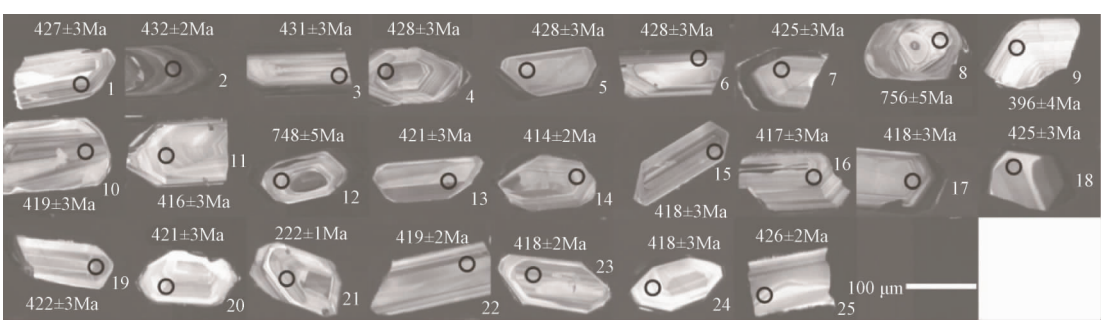


图3 中细粒二长花岗岩U-Pb定年测试锆石阴极发光图像

Fig. 3 Zircon CL images of middle-fine grained monzonite granite

锆石LA-ICP-MSU-Pb年龄分析结果见表1。本次测试测定25颗锆石的25个数据，测得的$^{206}Pb/^{238}U$年龄介于222～756 Ma。分析点8和12的$^{206}Pb/^{238}U$年龄为748～756 Ma位于锆石核部，这些锆石为二长花岗岩的源区残留锆石。

分析点9和21的$^{206}Pb/^{238}U$年龄为396 Ma和222Ma，位于锆石环带上，时代明显低于其余锆石年龄，区域资料表明存在早泥盆世和晚三叠世岩浆活动，二者锆石年龄受后期岩浆活动的影响。

其余数据投影点在U-Pb谐和图中位于谐和线或其附近（见图4），表明这些锆石在形成后U-Pb同位素体系保持封闭状态，测得的$^{206}Pb/^{238}U$年龄介于414～432 Ma，给出的$^{206}Pb/^{238}U$年龄加权平均值为（422.5±2.5）Ma（N=21，MSWD=4.0）（见图4），此年龄被解释为中细粒二长花岗岩的结晶年龄，时代为晚志留世。

4.2 岩石地球化学特征

苏盖提力克花岗岩的主量元素和微量元素分析结果及相关参数见表2。

4.2.1 主量元素特征

苏盖提力克花岗岩的SiO_2含量为72.53%～74.97%；Al_2O_3为13.6%～14.26%，K_2O含量为4.74%～5.59%，Na_2O含量为2.86%～3.30%，w（K_2O）/w（Na_2O）为1.48～1.93，A/CNK=1.07～1.11；CaO含量为0.89%～1.82%；CIPW

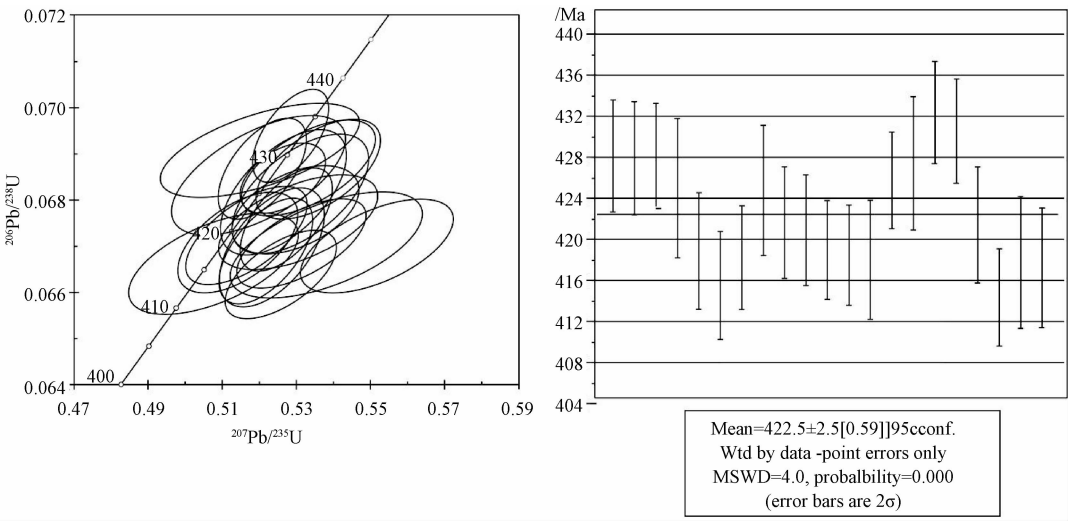


图 4　中细粒二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和曲线图

Fig. 4　Zircon U-Pb concordia diagram of middle-fine grained monzonite granite

表 1　二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果

Table 1　LA-ICP-MS zircon U-Pb data of monzonite granite

样品号	含量/×10⁻⁶		同位素比值										年龄/Ma					
P1TW1	Pb	U	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{208}Pb/^{232}Th$	1σ	$^{232}Th/^{238}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ
P1TW1.1	18	247	0.0686	0.0005	0.5196	0.0096	0.0549	0.0010	0.0211	0.0002	0.6024	0.0032	427	3	425	8	410	39
P1TW1.2	90	1380	0.0694	0.0004	0.5285	0.0044	0.0553	0.0004	0.0204	0.0002	0.0922	0.0007	432	2	431	4	423	17
P1TW1.3	15	204	0.0691	0.0004	0.5201	0.0110	0.0546	0.0011	0.0192	0.0001	0.7381	0.0025	431	3	425	9	395	46
P1TW1.4	42	631	0.0687	0.0004	0.5205	0.0049	0.0550	0.0005	0.0198	0.0001	0.2140	0.0012	428	3	425	4	411	20
P1TW1.5	23	321	0.0686	0.0004	0.5360	0.0068	0.0566	0.0007	0.0197	0.0001	0.5574	0.0022	428	3	436	6	477	26
P1TW1.6	21	274	0.0687	0.0004	0.5333	0.0075	0.0563	0.0008	0.0199	0.0001	0.7047	0.0062	428	3	434	6	464	30
P1TW1.7	23	340	0.0682	0.0005	0.5264	0.0070	0.0560	0.0007	0.0201	0.0001	0.3738	0.0055	425	3	429	6	452	27
P1TW1.8	38	313	0.1244	0.0008	1.1077	0.0103	0.0646	0.0005	0.0385	0.0003	0.1954	0.0016	756	5	757	7	761	18
P1TW1.9	9	136	0.0633	0.0006	0.4739	0.0245	0.0542	0.0027	0.0219	0.0005	0.5397	0.0022	396	4	394	20	379	114
P1TW1.10	24	342	0.0671	0.0005	0.5157	0.0074	0.0557	0.0007	0.0224	0.0001	0.4178	0.0019	419	3	422	6	439	29
P1TW1.11	19	276	0.0666	0.0004	0.5077	0.0094	0.0553	0.0010	0.0232	0.0002	0.4425	0.0016	416	3	417	8	424	39
P1TW1.12	43	357	0.1230	0.0009	1.0890	0.0104	0.0642	0.0005	0.0393	0.0002	0.2244	0.0029	748	5	748	7	748	18
P1TW1.13	43	576	0.0676	0.0005	0.5270	0.0052	0.0566	0.0005	0.0199	0.0001	0.7179	0.0040	421	3	430	4	475	20
P1TW1.14	34	402	0.0664	0.0004	0.5257	0.0062	0.0574	0.0006	0.0206	0.0002	1.2851	0.1485	414	2	429	5	508	25
P1TW1.15	35	481	0.0670	0.0005	0.5238	0.0058	0.0567	0.0006	0.0195	0.0001	0.7089	0.0039	418	3	428	5	482	23
P1TW1.16	40	570	0.0669	0.0005	0.5219	0.0051	0.0566	0.0005	0.0199	0.0001	0.5597	0.0052	417	3	426	4	476	20
P1TW1.17	26	326	0.0670	0.0004	0.5514	0.0084	0.0596	0.0009	0.0202	0.0001	1.0436	0.0036	418	3	446	7	590	31
P1TW1.18	22	270	0.0681	0.0005	0.5311	0.0076	0.0566	0.0008	0.0216	0.0001	0.9443	0.0093	425	3	433	6	474	30
P1TW1.19	24	340	0.0676	0.0004	0.5281	0.0076	0.0567	0.0008	0.0211	0.0001	0.4940	0.0028	422	3	431	6	478	30
P1TW1.20	16	215	0.0675	0.0004	0.5278	0.0101	0.0567	0.0011	0.0196	0.0001	0.8569	0.0048	421	3	430	8	481	41
P1TW1.21	13	357	0.0351	0.0002	0.2554	0.0061	0.0528	0.0012	0.0115	0.0001	0.4664	0.0062	222	1	231	5	321	53
P1TW1.22	29	416	0.0672	0.0004	0.5150	0.0063	0.0556	0.0006	0.0225	0.0001	0.3992	0.0214	419	2	422	5	437	26
P1TW1.23	29	388	0.0671	0.0004	0.5312	0.0072	0.0575	0.0007	0.0208	0.0002	0.6723	0.0297	418	2	433	6	509	29
P1TW1.24	13	184	0.0670	0.0005	0.5380	0.0106	0.0583	0.0011	0.0196	0.0002	0.5327	0.0020	418	3	437	9	540	43
P1TW1.25	31	437	0.0683	0.0004	0.5208	0.0070	0.0553	0.0007	0.0190	0.0002	0.5053	0.0065	426	2	426	6	425	29

表 2　苏盖提力克花岗岩主量元素（%）和微量元素（×10⁻⁶）及相关参数

Table 2　Major elements (%) and trace elements (%) in sugaitlike granites and related parameters

样号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	Los	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu
P1YQ1	74.14	0.21	13.91	0.29	0.91	0.04	0.27	1.26	3.3	4.87	0.055	0.67	48.17	92.74	10.23	34.05	5.82	0.76
P1YQ2	73.53	0.25	14.08	0.84	0.57	0.028	0.23	1.29	3.22	4.86	0.085	0.93	63.76	118.7	13.12	43.92	7.64	0.86
P1YQ3	74.97	0.11	13.89	0.41	0.41	0.021	0.15	0.89	2.89	5.59	0.046	0.59	38.47	70.86	7.88	27.07	5.67	0.59
P1YQ4	73.61	0.19	14.09	0.32	1.08	0.035	0.35	1.35	3.18	4.74	0.069	0.9	48.23	91.21	9.95	33.12	6.08	0.7
P1YQ5	74.37	0.19	13.6	0.45	0.84	0.032	0.25	1.07	2.86	5.21	0.069	0.95	52.03	98.09	10.72	36.21	6.61	0.7
P1YQ6	72.53	0.3	14.23	0.49	1.34	0.038	0.48	1.73	3	4.82	0.08	0.85	65.54	122.4	12.67	41.38	6.56	0.93
样号	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Rb	Sr	Ba	Ga	Nb	Ta	Zr	Hf	Th
P1YQ1	4.96	0.84	4.72	0.9	2.52	0.46	3.02	0.35	24.87	300.8	79.9	502.3	17.17	37.81	5.38	140.9	3.98	27.06
P1YQ2	6.2	0.91	4.25	0.73	1.95	0.3	2.38	0.28	20.21	313.8	63.2	472.7	20.15	46.07	4.85	183.8	5.16	21.61
P1YQ3	5.06	1.01	6.18	1.26	3.53	0.66	3.87	0.46	39.28	317.5	60.1	278.4	16.26	29.61	3.78	94.9	2.87	19.58
P1YQ4	5.01	0.82	4.32	0.82	2.23	0.38	2.22	0.29	24.72	240	98.1	658.9	17.75	28.87	3.9	130.5	3.26	26.6
P1YQ5	5.32	0.83	4.2	0.76	2.02	0.34	2.06	0.24	22.6	302.3	50.3	361.1	18.39	37.2	5.43	121.9	2.86	20.32
P1YQ6	5.47	0.77	4.02	0.78	2.13	0.36	2.04	0.23	22.69	268.2	135.1	1618	17.54	35.46	3.38	184.9	5.21	26.67
样号	V	Cr	Sc	U	AR	K_2O/Na_2O	A/CNK	C	$Mg^{\#}$	∑REE	$(La/Yb)_N$	δEu	$(La/Sm)_N$	$(Gd/Yb)_N$	$(Ho/Yb)_N$	Rb/Sr	Rb/Ba	Y/Yb
P1YQ1	8.9	3.5	3.86	2.68	2.54	1.48	1.07	1.07	29	209.53	10.77	0.42	5.2	1.33	0.87	3.77	0.6	8.24
P1YQ2	14.7	4.9	3.4	4.94	2.44	1.51	1.09	1.39	25	265.04	18.07	0.37	5.25	2.1	0.9	4.97	0.66	8.5
P1YQ3	4.4	4.4	2.76	5	2.28	1.93	1.11	1.56	25	172.56	6.7	0.33	4.27	1.05	0.95	5.29	1.14	10.15
P1YQ4	11.7	5.3	3.47	2.02	2.4	1.49	1.1	1.42	32	205.37	14.64	0.38	4.99	1.82	1.07	2.45	0.36	11.12
P1YQ5	8.2	4.7	2.96	3.66	2.28	1.82	1.11	1.46	25	220.13	17.02	0.35	4.95	2.08	1.07	6.01	0.84	10.96
P1YQ6	20.3	5	3.77	2.39	2.2	1.61	1.08	1.1	32	265.27	21.66	0.46	6.29	2.16	1.12	1.99	0.17	11.12

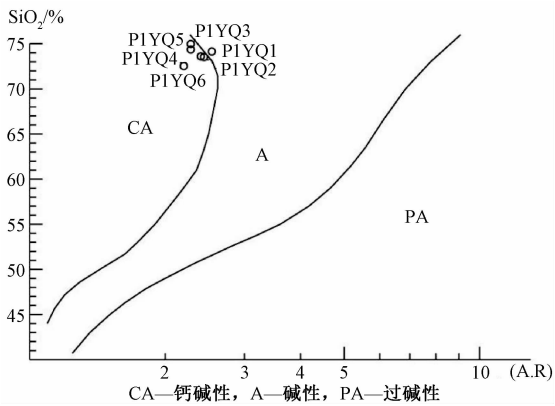


图 5 SiO_2-A. R 图解[15]

Fig. 5 SiO_2-A. R diagram[15]

刚玉分子 C 含量为 1.07% ~ 1.56%；镁指数 $Mg^{\#}$ 为 25 ~ 32；在 SiO_2-A. R 图解中落入钙碱性系列区（见图 5），在 SiO_2-K_2O 图解中落入高钾钙碱性系列（见图 6）。

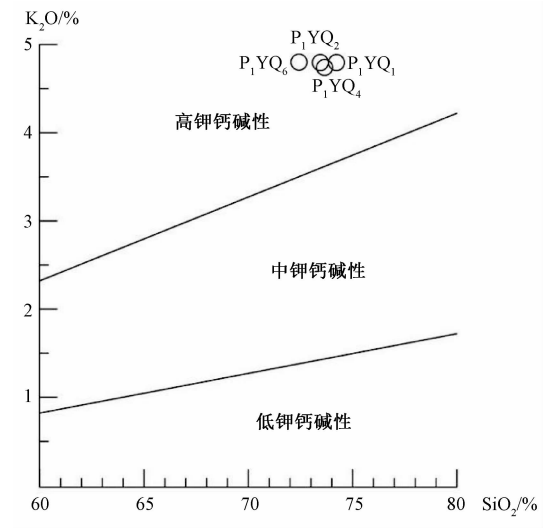


图 6 SiO_2-K_2O 图解[16]

Fig. 6 SiO_2-K_2O diagram[16]

4.2.2 微量元素特征

苏盖提力克花岗岩稀土元素总量 ∑REE = 172.56×10^{-6} ~ 265.27×10^{-6}，含量较高；$(La/Yb)_N$ = 6.7 ~ 21.66，$(La/Sm)_N$ = 4.27 ~ 6.29，$(Gd/Yb)_N$ = 1.05 ~ 2.10，$(Ho/Yb)_N$ = 0.87 ~ 1.12，轻稀土富集，轻、重稀土强烈分馏，轻稀土分馏强烈，重稀土强分馏；δEu = 0.33 ~ 0.46，具中等负铕异常，稀土元素球粒陨石标准化配分曲线呈强烈右倾，重稀土平坦，铕中等亏损（见图 7）。

苏盖提力克花岗岩微量元素原始地幔标准化（见图 8）显示大离子亲石元素 Rb、K 富集，Ba、Sr 强烈亏损，高场强元素 Th、La、Zr、Sm、Y 和 Yb 富集，Nb 弱亏损，Ti 和 P 强烈亏损。苏盖提力克花岗富 Rb（240.0×10^{-6} ~ 317.5×10^{-6}）和 Nb（28.87×10^{-6} ~ 46.07×10^{-6}），Rb/Sr 为 1.99 ~ 6.01，Rb/Ba 为 0.17 ~ 1.14，Nb/Ta 为 7.03 ~ 10.49。

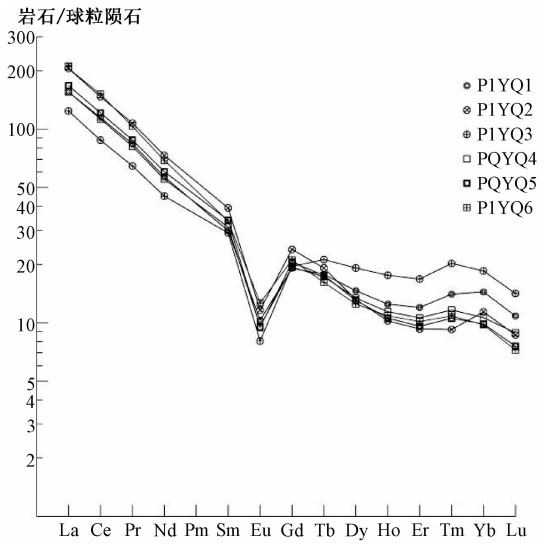


图 7 球粒陨石标准化 REE 模式图[17]

Fig. 7 Chondrite normalized REE pattern[17]

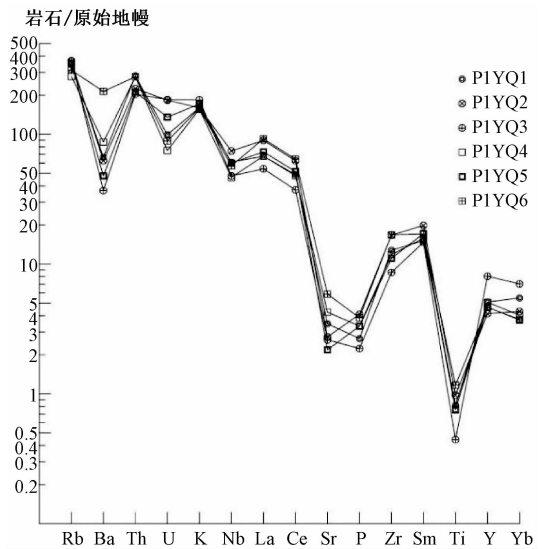


图 8 微量元素原始地幔标准化蛛网图[18]

Fig. 8 Primitive mantle normalized diagram of trace elements[18]

5 讨论

5.1 岩石成因及源区性质

花岗岩最普遍的分类方案是 I 型、S 型、A 型和 M 型，廖忠礼等研究西藏 S 型质花岗岩的典型

主要副矿物为白钛石、锐钛矿、板钛矿、独居石、磷钇矿、石榴子石、电气石等，刚玉分子数大于 1%[19]；强过铝质花岗岩含有原生石榴子石、白云母和堇青石等，刚玉分子 C > 1%，A/CNK ≥ 1.1，变质沉积岩是强过铝质花岗岩和 S 型花岗岩的主要源区[15]。

苏盖提力克花岗岩 SiO_2 = 72.53% ~ 74.97%，A/CNK = 1.07 ~ 1.11，刚玉分子为 1.07% ~ 1.56% >1%，$K_2O > Na_2O$，造岩矿物有原生白云母，副矿物有独居石、磷灰石和磷钇矿，与典型强过铝质 S 型花岗岩的岩石学、地球化学、矿物学特征较一致，表明苏盖提力克花岗岩属于强过铝质 S 型花岗岩。

王德滋等[20]认为 Rb 富集于成熟度高的地壳，Sr 在成熟度低，演化程度低的地壳中富集，因此 Rb/Sr 比值较好记录源区物质的性质；Taylor 和 McLennan[21]计算陆壳 Rb/Sr 平均值为 0.24，苏盖提力克二长花岗岩 Rb/Sr = 1.99 ~ 6.01，平均值为 4.08 远高于地壳平均值，表明苏盖提力克二长花岗岩的源区为地壳物质。

苏盖提力克花岗岩 Rb/Sr 为 1.99 ~ 6.01，Rb/Ba 为 0.17 ~ 1.14，S 型花岗岩不同源区具有不同 Rb/Sr 和 Sr/Ba 比值[22]，同时在 Rb/Sr-Rb/Ba 图中样品落入杂砂岩部分熔融区和泥质岩部分熔融区（见图 9），表明苏盖提力克花岗岩源区组成复杂，由杂砂岩和泥质岩构成，暗示岩浆源区为地壳沉积岩。

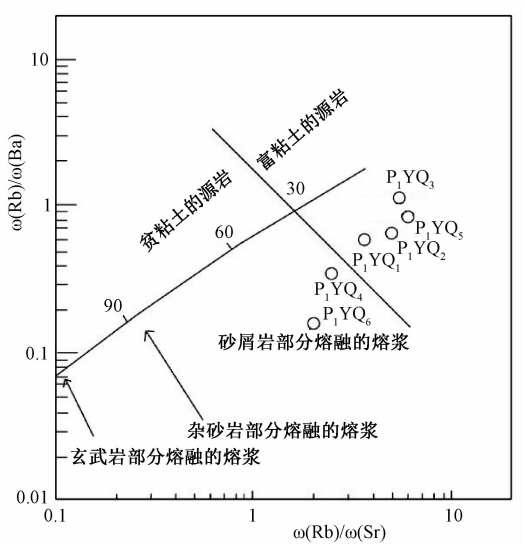


图 9　Rb/Sr-Rb/Ba 图解[23]

Fig. 9　Rb/Sr-Rb/Ba diagram[23]

苏盖提力克花岗岩 $(Ho/Yb)_N$ = 0.87 ~ 1.12 < 1.2，Y/Yb = 8.24 ~ 11.12，平均为 10.01 ≈ 10，岩浆源区无石榴子石残留。邓晋福等[11]认为含石榴子石过铝质岩浆形成深度大于 25 km，苏盖提力克花岗岩含有原生白云母不发育石榴子石，暗示花岗岩浆形成深度小于 25 km；与地球化学反映信息一致，苏盖提力克花岗岩岩浆成因与石榴子石无关。

5.2　构造环境分析

内蒙古第九地质矿产勘查开发院在侵入库地缝合带的晚奥陶世细粒正长花岗岩获得锆石 U-Pb 年龄（459.3 ± 1.1）Ma，认为其是库地缝合带闭合后的碰撞造山同逆冲—同剪切时期产物[11]；西昆仑地区中晚志留世达坂沟组为浅海相碳酸盐岩沉积，暗示中晚志留世时期西昆仑处于后碰撞阶段；周辉等[2]研究侵入库地蛇绿岩和剪切带的煌斑岩 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 等时线年龄为 404 Ma，时代为早泥盆世，代表碰撞后期松弛阶段；西昆仑地区晚泥盆世奇自拉夫组发育陆相红色磨拉石沉积，是后碰撞伸展背景下的地质反映；区域地层资料、地质调查成果与周辉等的研究都表明西昆仑地区加里东期后碰撞与碰撞后伸展转换时期为中晚志留世—早泥盆世。

通过地质调查发现苏盖提力克花岗岩发育于库地缝合带南侧；而 1∶25 万麻扎—神仙湾幅地质调查时，在库地缝合带蛇绿混杂岩北侧托排土达坂一带也发现了晚志留世二长花岗岩，研究认为其属于 S 型花岗岩，锆石 U-Pb 年龄为 412.18 Ma，时代为晚志留世[24]；该二长花岗岩的地质、地球化学以及时代特征均与文中苏盖提力克花岗岩相似，表明晚志留世 S 型花岗岩在库地缝合带两侧普遍发育，暗示晚志留世时期库地缝合带已经闭合两侧地块发生碰撞；已有研究表明大量的强过铝质花岗岩是后碰撞环境下形成的[25~27]，故此苏盖提力克花岗岩代表原特提斯洋闭合后碰撞造山环境。

结合区域地质资料和已有研究成果，文章研究认为库地南晚志留世苏盖提力克花岗岩属于 S 型花岗岩，形成于后碰撞环境，从而说明早古生代原特提斯洋由消减闭合到陆陆碰撞—碰撞后伸展转换时间为（422.5 ± 2.5）Ma，即晚志留世时期西昆仑库地一带原特提斯洋已经消减闭合且处于后碰撞阶段。

6 结论

(1) 应用 LA-ICP-MS 方法测得库地南苏盖提力克中细粒花岗岩体的锆石$^{206}Pb/^{238}U$年龄为(422.5±2.5) Ma (N=21, MSWD=4.0), 该年龄可以代表其形成年龄, 为晚志留世。

(2) 苏盖提力克中细粒花岗岩为高钾钙碱性系列, 其岩石学、地球化学、矿物学特征表明其来源于的大陆地壳, 形成于后碰撞环境, 为强过铝质 S 型花岗岩。

(3) 苏盖提力克中细粒花岗岩属于 S 型花岗岩, 形成于后碰撞环境, 说明晚志留世时期西昆仑库地一带原特提斯洋已经消减闭合且处于后碰撞阶段。因此确定原特提斯洋由消减闭合到陆陆碰撞—碰撞后伸展转换时期为晚志留世。

致谢: 项目实施过程中河北省区域地质调查院的班长勇教授级高级工程师、李俊录高级工程师参加了野外工作, 对项目进行指导, 样品分析过程中受到河北省区域地质调查院实验室和天津地质调查中心实验室的帮助, 在此一并致谢!

参考文献/References

[1] 王元龙, 李向东, 毕华, 等. 西昆仑库地北构造带两侧地质特征对比及其大地构造意义 [J]. 地球化学, 1997 (2): 53~59.
WANG Yuanlong, LI Xiangdong, BI Hua, et al. Geological characteristics of northern Kudi structure belt, Western Kunlun and their geotectonic implications [J]. Geochemistry, 1997 (2): 53~59. (in Chinese with English abstract)

[2] 周辉, 李继亮. 西昆仑库地煌斑岩的年代学及地球化学特征 [J]. 岩石学报, 2000, 16 (3): 380~384.
ZHOU Hui, LI Jiliang. Age and geochemical features of lamprophyres in Kuda, western Kunlun [J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16 (3): 380~384. (in Chinese with English abstract)

[3] 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): 745~750.
XIAO Xuchang, WANG Jun, SU Li, et al. A further discussion of the Kuda ophiolite, West Kunlun, and its tectonic significance [J]. Regional Geology of China, 2003, 22 (10): 745~750. (in Chinese with English abstract)

[4] 郝杰, 刘小汉, 方爱民, 等. 西昆仑“库地蛇绿岩”的解体及有关问题的讨论 [J]. 自然科学进展, 2003, 13 (10): 1116~1120.
HAO Jie, LIU Xiaohan, FANG Aimin, et al. Discussion on the disintegration of Kudu Ophiolitic rock in west Kunlun and discussion of related problems [J]. Progress in Natural Science, 2003, 13 (10): 1116~1120. (in Chinese)

[5] 袁超, 孙敏, 李继亮, 等. 西昆仑库地蛇绿岩的构造背景: 来自玻安岩系岩石的新证据 [J]. 地球化学, 2002, 31 (1): 43~48.
YUAN Chao, SUN Min, LI Jiliang, et al. Tectonic background of the Kü da ophiolite, western Kunlun: New constraints from boninite series rocks [J]. Geochemistry, 2002, 31 (1): 43~48. (in Chinese with English abstract)

[6] 崔建堂, 王炬川, 边小卫, 等. 西昆仑康西瓦北侧早古生代角闪闪长岩、英云闪长岩的地质特征及其锆石 SHRIMP U-Pb 测年 [J]. 地质通报, 2006, 25 (12): 1441~1449.
CUI Jiantang, WANG Juchuan, BIAN Xiaowei, et al. Geological characteristics of Early Paleozoic amphibolite and tonalite in northern Kangxiwar, West Kunlun, China and their zircon SHRIMP U-Pb dating [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25 (12): 1441~1449. (in Chinese with English abstract)

[7] 黄建国, 杨瑞东, 杨剑, 等. 西昆仑北缘库斯拉甫一带寒武纪中酸性岩浆活动及地质意义 [J]. 地球化学, 2013, 42 (5): 454~466.
HUANG Jianguo, YANG Ruidong, YANG Jian, et al. Cambrian intermediate-acid magmatic activity and its geological significance in the Kusilafu region at the north margin of the Western Kunlun [J]. Geochimica, 2013, 42 (5): 454~466. (in Chinese with English abstract)

[8] 高晓峰, 校培喜, 康磊, 等. 西昆仑大同西岩体成因: 矿物学、地球化学和锆石 U-Pb 年代学制约 [J]. 岩石学报, 2013, 29 (9): 3065~3079.
GAO Xiaofeng, XIAO Peixi, KANG Lei, et al. Origin of Datongxi pluton in the West Kunlun orogen: Constraints from mineralogy, elemental geochemistry and zircon U-Pb age [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29 (9): 3065~3079. (in Chinese with English abstract)

[9] 王超, 刘良, 何世平, 等. 西昆仑早古生代岩浆作用过程: 布隆花岗岩地球化学和锆石 U-Pb-Hf 同位素组成研究 [J]. 地质科学, 2013, 48 (4): 997~1014.
WANG Chao, LIU Liang, HE Shiping, et al. Early Paleozoic magmatism in west Kunlun: Constraints from geochemical and zircon U-Pb-Hf isotopic studies of the Bulong granite [J]. Chinese Journal of Geology, 2013, 48 (4): 997~1014. (in Chinese with English abstract)

[10] 黄朝阳, 王核, 刘建平, 等. 西昆仑柯岗蛇绿岩地质地球化学特征及构造意义 [J]. 地球化学, 2014, 43 (6): 592~601.
HUANG Chaoyang, WANG He, LIU Jianping, et al. Geological, geochemical features and structure significance of Kegang ophiolite, West Kunlun [J]. Geochimica, 2014, 43 (6): 592~601. (in Chinese with English abstract)

[11] 班长勇, 专少鹏, 白春东, 等. 新疆库地东一带 1:50000 区域地质调查报告 [R]. 内蒙古自治区第九地质矿产勘查开发院, 2014. BAN Changyong, ZHUAN Shaopeng, BAI

Chundong, et al. Geological survey report of 1∶50000 in the east of kudi, xinjiang [R]. The 9th institute of geological and mineral exploration and development, Inner Mongolia autonomous region, 2014. (in Chinese)

[12] 耿建珍，张健，李怀坤，等. 10μm 尺度锆石 U-Pb 年龄的 LA-MC-ICP-MS 测定 [J]. 地球学报，2012，33 (6)：877～884.
GENG Jianzhen, ZHANG Jian, LI Huaikun, et al. Ten-micron-sized Zircon U-Pb Dating Using LA-MC-ICP-MS [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33 (6): 877～884. (in Chinese with English abstract)

[13] 王文龙，滕学建，刘洋，等. 内蒙古狼山乌和尔图花岗岩岩体锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征 [J]. 地质力学学报，2017，23 (3)：. 382～396.
WANG Wenlong, TENG Xuejian, LIU Yang, et al. Zircon U-Pb chronology and geochemical characteristics of the Wuheertu granite mass in Langshan, inner Mongolia [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23 (3): 382～396. (in Chinese with English abstract)

[14] 张耀玲，沈燕绪，吴珍汉，等. 西藏改则地区美苏组岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义 [J]. 地质力学学报，2018，24 (1)：. 128～136
ZHANG Yaoling, SHEN Yanxu, WU Zhenhan, et al. Zircon U-Pb ages of magmatic rocks from Meisu formation in Gerze area in Tibet and its geological significance [J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24 (1): 128～136. (in Chinese with English abstract)

[15] 邓晋福，罗照华，苏尚国，等著. 岩石成因、构造环境与成矿作用 [M]. 北京：地质出版社，2004.
DENG Jinfu, LUO Zhaohua, SU Shangguo, et al. Rock Formation, Tectonic Environment and Mineralization [M]. Beijing: Geological Pulishing House, 2004. (in Chinese)

[16] Peccerillo A, Taylor A R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58 (1): 63～81.

[17] Boynton W V. Geochemistry of rate-earth elements: Meteorite studies [A]. Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry [C]. Amsterdam: Elsevier, 1984, 63～114

[18] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D, Norry MJ. Magmatism in Ocean Basins [M]. Geological Society, London, Special Publication, 1989, 42 (1): 313～345.

[19] 廖忠礼，莫宣学，潘桂堂，等. 西藏过铝花岗岩副矿物特征及岩石成因意义 [J]. 地球学报，2006，27 (2)：115～122.
LIAO Zhongli, MO Xuanxue, PAN Guitang, et al. Characteristics of the accessory minerals from the Peraluminous granites in Tibet and their implications [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27 (2): 115～122. (in Chinese with English abstract)

[20] 王德滋，刘昌实，沈渭洲，等. 桐庐 I 型和相山 S 型两类碎斑熔岩对比 [J]. 岩石学报，1993，9 (1)：44～54.
WANG Dezi, LIU Changshi, SHEN Weizhou, et al. The contrast between Tonglu I-type and Xiangshan S-type Clastoporphyritic lava [J]. Acta Petrologica Sinica, 1993, 9 (1): 44～54. (in Chinese with English abstract)

[21] Taylor S R, Mclennan S M. The continental crust: its composition and evolution: An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks [M]. Oxford: Blackwell Science, 1985.

[22] 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.
XIAO Qinghui, DENG Jinfu, MA Daquan, et al. The ways of investigation on granitoids [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002. (in Chinese)

[23] Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites [J]. Lithos, 1998, 45 (1～4): 29～44.

[24] 计文化，尹宗义，李博秦，等. 麻扎—神仙湾 1∶25 万区域地质调查报告 [R]. 陕西省地质调查院，2004.
JI Wengua, YIN Zongyi, LI Boqin, et al. Regional geological survey report of 10: 250, 000 people in shaza-shenxianwan [R]. Geological Survey Institute of Shanxi Province, 2004. (in Chinese)

[25] Pitcher W S. The nature and origin of granite [M]. London: Blackie Academic and Professional Press, 1993, 321

[26] Bellieni G, Cavazzini G, Fioreti A M, et al. The Cima di vila (Zinsnock) Intrusion, Eastern Alps: evidence for crustal melting, acid-mafic magma mingling and Wall-rock fluid effects [J]. Mineralogy and Petrology, 1996, 56 (1～2): 125～146

[27] Searle M P, Parrish R R, Hodges K V, et al. Shisha Pangma leucogranite, South Tibetan Himalaya: field relations, Geochemistry, Age, Origin, and emplacement [J]. The Journal of Geology, 1997, 105 (3): 295～317.