doi: 10.11720/wtyht.2021.1185

方永坤,曹成刚,董峻麟,等.青海省天峻县阳康地区花岗岩岩体锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征研究[J].物探与化探,2021,45(6):1367-1377.http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1185

Fang Y K, Cao C G, Dong J L, et al. Geochronology and geochemistry of the granodiorite intrusion in Yangkang area of Qinghai Province and its geological significance [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(6):1367-1377.http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1185

青海省天峻县阳康地区花岗岩岩体锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征研究

方永坤^{1,2,3,4},曹成刚^{1,2,3,4},董峻麟⁵,李领贵⁵

(1.青海省环境地质勘查局,青海 西宁 810001;2.青海九零六工程勘察设计院,青海 西宁 810001;3.青海省环境地质重点实验室,青海 西宁 810001;4.青海省地质环境保护与灾害防治工 程技术研究中心,青海 西宁 810001;5.青海省第五地质勘查院,青海 西宁 810000)

摘要:对南祁连阳康地区花岗闪长岩岩体进行了锆石 U-Pb 年代学及岩石地球化学研究,以便对其岩石成因和中一南祁连消减拼合作用的开始时间给予制约。花岗闪长岩中 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明,该岩体形成于晚奥陶世(444±1.2 Ma, MSWD=1.14),属于高钾钙碱性系列,A/CNK 值介于 1.007~1.104,属弱过铝质,为 I 型花 岗岩,并且明显富集大离子亲石元素(如 K、Ba、Rb)、轻稀土元素(LREE)及 Th,相对亏损高场强元素(如 Ta、Nb)。上述结果表明,该类岩体的原始岩浆应起源于地壳的部分熔融。综合区域同时代火成岩的研究成果,认为花岗闪 长岩岩体形成于活动大陆边缘的构造背景。

关键词:晚奥陶世;锆石 U-Pb 测年;岩石地球化学;阳康花岗岩;南祁连块体

中图分类号: P632 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2021)06-1367-11

0 引言

祁连造山带具有极为复杂的大地构造演化历 史,是近年来热点研究区之一。该造山带又分为北 祁连、中祁连及南祁连3个次级造山带,3者拥有共 同的前寒武纪结晶基底^[1],其构造演化普遍认为是 随着中祁连及北祁连发生大陆裂解,形成北祁连洋 盆后,中南祁连地块发生裂解分离,逐渐发育为南祁 连洋盆。加里东期末期北祁连洋盆及南祁连洋盆均 发生俯冲消减,陆块完成拼合^[2]。其中,中祁连与 南祁连俯冲拼合时限与机制存在一定争议,其原因 主要集中在对该构造带内断续出露的寒武—奥陶系 基性—中性火山岩、超基性岩及相关沉积组合形成 构造环境认识的差异:如大陆裂谷^[3-5]、地幔柱^[6]、 外来块体^[7]及沟弧体系^[8]等,从而限制了对祁连造 山带构造演化的认识。近年来,通过对祁连造山带 岩浆岩^[9-10]、变质岩、河流碎屑沉积物^[11-14]以及区 域构造等的研究,前人对沿碰撞带分布的微陆块在 汇聚碰撞过程中的构造过程以及与地壳相关的构 造—岩浆历史取得了瞩目的成果。由于南祁连早古 生代岩浆活动研究数据较为分散,晚古生代盖层大 面积出露等因素导致一些基本问题:构造属性,岩 浆—构造历史以及相关的地壳形成,以及南祁连构造 带的演化仍在争论中。因此笔者选择阳康地区花岗 闪长岩岩体进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究 和岩石地球化学分析,探讨花岗闪长岩成因类型和构 造环境,为进一步制约南祁连的构造演化提供依据。

1 地质背景

祁连造山带主要分为北祁连、中祁连和南祁连 3个构造带(图1)。北祁连构造带发育完整的沟— 弧—盆体系岩石组合,包括增生楔、洋岛/海山、蛇绿

收稿日期: 2020-04-19; 修回日期: 2020-12-18

第一作者:方永坤(1986-),男,硕士,工程师,矿床地球化学方向。Email:36529429@qq.com

基金项目:青海省地质勘查基金项目"青海省天峻县阳康地区 J47E13011 等五幅 1:5万区域地质矿产调查"(青国土资矿[2011]277)





Fig.1 Geological sketch map of the studied area (revised according to reference [19])

岩、HP/LT 变质带、岛弧和弧前/弧后盆地等地质单 元[15-17]。中祁连构造带由前寒武纪花岗片麻岩、斜 长角闪岩和变沉积岩[4,18]以及叠加于其上的早古生 代俯冲和碰撞相关的钙碱性侵入岩共同构成^[20-22]. 在湟源县城附近主要发育湟源群(包括刘家台组、 东岔沟组、磨石沟组和青石坡组)和花石山群^[23]。 南祁连构造带岩石组合类型时空差异较大,其中西 段是由下古生界杂砂岩、板岩夹硅质岩及灰岩透镜 体组成,东段是由前寒武纪黑云母斜长片麻岩、黑云 母钾长片麻岩以及少量石榴子石斜长角闪岩和石英 岩共同组成(即化隆岩群),同时发育大量与早古生 代俯冲、碰撞作用密切相关的花岗岩和镁铁质—超 镁铁质岩侵入体[24-26]。同时,南祁连构造带北缘断 续发育一套由早古生代枕状玄武岩、辉长辉绿岩、超 基性岩等构成的蛇绿岩带,自西向东断续出露于盐 池湾大道尔吉、天峻县木里、刚察县纳任哇尔玛、湟 中一化隆县拉脊山和兰州等地区。拉脊山蛇绿岩是 该蛇绿岩带中规模最大的蛇绿岩,同时也是南祁连 构造带的重要组成部分,南北两侧分别与中祁连湟 源群和南祁连化隆岩群断层接触,主要由变质橄榄 岩、超镁铁--镁铁质堆晶岩、辉长岩、辉绿岩、枕状玄 武岩和深海硅质岩共同构成^[8,27]。

区域上,拉脊山地区出露的岩石主要为寒武系 火山沉积岩系、寒武系超基性岩、奥陶系火山岩和沉 积岩以及少量志留系一泥盆系陆相碎屑沉积组合, 其中寒武系火山沉积岩系包括枕状玄武岩、安山岩、 凝灰岩、硅质岩和灰岩透镜体,灰岩透镜体中产沟颊 虫,隐球接子,库廷虫,蝴蝶三叶虫,球接子类,多 节类三叶虫等化石^[28-30];寒武系超基性岩包括辉石 橄榄岩、橄榄岩、辉石岩和蛇纹岩;奥陶系主要为安 山岩、英安岩、凝灰岩、砾岩和砂岩;志留系和泥盆系 由砾岩、含砾砂岩、砂岩和粉砂岩组成,砂岩中发育 槽状、楔状及板状斜层理,砾岩中砾石叠瓦状构造极 为发育。志留系和泥盆系角度不整合于寒武系和奥 陶系之上。

研究区位于南祁连中段,区内地层自元古宇— 新生界均有不同程度分布,其中新元古界阳康片岩 是测区最老的地层,其次为奥陶系盐池湾组,二叠系 巴音河群主要有勒门沟组、草地沟组、哈吉尔组、忠 什公组,下—中三叠统郡子河群、上三叠统默勒群出 露范围较少,新近系咸水河组、第四系砂砾石多出露 于地势较低的主河道两侧。区内岩浆侵入活动微 弱,主要呈岩株状分布,主要有辉长岩、石英闪长岩 和花岗闪长岩,还有少量的各类脉岩。岩浆侵入时 代为主要为新元古代和奥陶纪晚期。断裂构造较发育,按走向大致可划分为 NW、NE、SN 和 EW 向断裂,从各组断裂的相互切割关系上看,NW 向断裂是测区最早的断裂组,NE 向断裂是测区最新的断裂组。区内褶皱构造发育不均,元古宇、奥陶系地层内较为发育,其次为二叠系地层,多为宽缓背向斜,主要以近 EW 向和 NW 向的宽缓褶皱为主。

花岗闪长岩岩体位于研究区西南,沿构造呈 NW-SE向展布,长5km,宽约2~3km,内部发育有 较多的变质砂岩包体。该岩体侵入新元古界阳康片 岩、奥陶系盐池湾组中,被二叠系地层系不整合覆盖 (采样位置见图1)。花岗闪长岩新鲜面呈灰白色, 中细粒结构,块状构造,主要由角闪石、斜长石、微斜 长石、黑云母及少量的石英组成,矿物大小不等。石 英呈不规则状、他形粒状充填,约占20%;微斜长石 约占7%~8%,呈不规则状、粒状,粒度为0.2~2.0 mm,具条纹结构和格子双晶,局部见有交代包裹斜 长石、黑云母现象;斜长石呈自形板状,粒度0.25~ 1.55 mm,多具聚片双晶和环带构造,较强帘石化,局 部见有强烈的绢云母化,轻微碳酸盐化,约占60%; 黑云母呈片状,约占5%~6%,局部见有强烈的绿泥 石化,并伴有铁质析出。

2 分析方法

野外挑选新鲜无蚀变的样品,样品编号为 Pm04-4。将样品粉碎至 200 目,利用标准重矿物分离技术 分选出锆石。经过双目镜下仔细挑选,将不同特征的 锆石粘在双面胶上,并用无色透明的环氧树脂固定; 待其固化之后,抛光露出锆石表面,对锆石进行反射 光透射光和阴极发光图像采集(CL),在上述工作的基础上进行锆石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年。

同位素测年样品在天津地质矿产研究所测试完成。本次测试采用激光单点剥蚀,数据采集采用调峰方式,锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标,标准玻璃 NIST SRM610 作为内标,校正锆石微量元素。分析方法见文献[31];分析结果采用 Glitter 4.0 进行处理计算。

野外挑选5件新鲜无蚀变样品(PM07-3、PM07-8、PM17-7、PM17-8、QC8112)进行全岩主微量元素 分析,测试工作由自然资源部长春矿产资源监督检 测中心承担完成,主量元素利用熔片X-射线荧光光 谱法(XRF)测定,并采用等离子光谱和化学法测定 进行相互检测。微量元素和稀土元素采用电感耦合 等离子质谱法(ICP-MS)测定。主量元素分析精度 和准确度优于5%,微量稀土元素分析精度和准确 度优于10%。分析方法见文献[32]。

3 分析结果

3.1 LA-ICP-MS 锆石测年

岩石样品 Pm04-4 中锆石较为完整,表面干净, 多为自形晶—半自形晶,长宽比 1:2~1:4,阴极发光 图像显示锆石震荡环带清楚(图 2),成因为岩浆锆 石,于样品 Pm04-4 中选择了 18 件锆石样品进行了 U-Pb 同位素测定,测试结果见表 1 和图 2。分析结 果在一致线曲线上成群分布(图3),w(²⁰⁶ Pb)/ w(²³⁸U)年龄介于 440~448 Ma,加权平均年龄为 444 ±1.2 Ma,MSWD=1.14,代表了岩浆结晶时代,为花 岗岩岩体形成的时代,属奥陶纪晚期。



图 2 阳康地区花岗闪长岩锆石阴极发光图像 Fig.2 An image of granodiorite travertine in Yangkang area

· 1370 ·

表1 阳康地区花岗闪长岩同位素测年结果

Table 1 Isotopic dating results of granodiorite in Yangkang area

样	含量	/10 ⁻⁶					同位素	比值							年龄/M	a		
前号	Pb	U	$^{206}\mathrm{Pb}/^{238}\mathrm{U}$	1σ	$^{207}\mathrm{Pb}/^{235}\mathrm{U}$	1σ	$^{207}{ m Pb}/^{206}{ m U}$	1σ	$^{208}\mathrm{Pb}/^{232}\mathrm{U}$	1σ	232 Pb/ 238 U	1σ	$^{206}\mathrm{Pb}/^{238}\mathrm{U}$	1σ	$^{207}\mathrm{Pb}/^{235}\mathrm{U}$	1σ	$^{207}\mathrm{Pb}/^{206}\mathrm{U}$	1σ
1	63	638	0.0707	0.0004	0.5532	0.0097	0.0568	0.0010	0.0226	0.0004	1.6932	0.0068	440	3	447	8	482	38
2	48	628	0.0707	0.0004	0.5410	0.0090	0.0555	0.0009	0.0235	0.0007	0.6166	0.0015	440	3	439	7	432	36
3	78	920	0.0710	0.0004	0.5520	0.0077	0.0564	0.0008	0.0240	0.0010	0.9622	0.0009	442	2	446	6	468	31
5	23	235	0.0721	0.0006	0.5671	0.0315	0.0571	0.0032	0.0277	0.0018	1.3363	0.0021	449	4	456	25	495	122
7	21	247	0.0713	0.0005	0.5598	0.0333	0.0569	0.0034	0.0330	0.0028	0.6607	0.0042	444	3	451	27	489	132
8	44	515	0.0706	0.0005	0.5488	0.0134	0.0564	0.0013	0.0355	0.0033	0.6807	0.0014	440	3	444	11	467	51
9	27	315	0.0719	0.0004	0.5660	0.0186	0.0571	0.0019	0.0310	0.0029	0.7146	0.0032	448	3	455	15	494	72
10	18	201	0.0720	0.0005	0.5630	0.0280	0.0567	0.0028	0.0290	0.0026	0.8715	0.0019	448	3	453	23	482	109
11	14	167	0.0718	0.0005	0.5527	0.0353	0.0559	0.0035	0.0300	0.0025	0.6928	0.0006	447	3	447	29	447	140
13	20	232	0.0719	0.0005	0.5566	0.0259	0.0561	0.0026	0.0234	0.0015	1.0709	0.0039	448	3	449	21	458	102
15	21	258	0.0713	0.0004	0.5546	0.0192	0.0564	0.0020	0.0219	0.0011	0.8837	0.0045	444	3	448	16	470	77
16	14	182	0.0716	0.0005	0.5564	0.0243	0.0564	0.0024	0.0201	0.0010	0.6374	0.0030	446	3	449	20	468	95
17	37	534	0.0712	0.0004	0.5471	0.0108	0.0557	0.0011	0.0182	0.0009	0.3169	0.0017	443	3	443	9	442	43
20	21	318	0.0718	0.0004	0.5666	0.0210	0.0572	0.0021	0.0201	0.0008	0.0628	0.0003	447	3	456	17	499	82
23	15	184	0.0708	0.0004	0.5558	0.0207	0.0569	0.0021	0.0201	0.0008	0.8942	0.0039	441	3	449	17	489	81
24	32	436	0.0717	0.0004	0.5524	0.0121	0.0559	0.0012	0.0180	0.0007	0.4893	0.0004	447	2	447	10	447	48
26	17	211	0.0714	0.0004	0.5634	0.0191	0.0572	0.0019	0.0192	0.0009	0.8418	0.0031	445	3	454	15	499	73
30	18	244	0.0712	0.0004	0.5579	0.0207	0.0568	0.0021	0.0205	0.0011	0.4750	0.0007	443	3	450	17	485	81





3.2 地球化学特征

3.2.1 主量元素

阳康地区花岗闪长岩分析结果及特征值见表 2,其中SiO₂含量为64.72%~69.05%,在TAS岩石 分类图解中(图4),样品均落于亚碱性系列范围、花 岗闪长岩区,与定名吻合。全碱含量介于6.23%~7. 51%之间,Na₂O和K₂O分别介于2.37%~3.75% 和3.51%~3.91%之间;w(K₂O)/w(Na₂O)值为 0.94~1.63,除Pm17-7号样品外,均显示富钾特征。 在w(SiO₂)-w(K₂O)图解中,样品全部落入高钾钙 碱性系列区域(图5a),Al₂O₃含量较高且变化范围



Fig.4 Diagram of TAS rock classification in Yangkang area

Table 2	Major, REE and trace element content and parameter of the granodiorite in Yangkang										
	PM07-3	PM07-8	PM017-7	PM017-8	QC8112						
SiO ₂	68.14	69.05	64.72	67.81	68.83						
LOS	0.69	0.9	2.02	1.82	1.33						
FeO	3.88	3.42	2.83	3.68	3.95						
Fe_2O_3	0.54	0.61	0.71	1.06	0.85						
TiO ₂	0.38	0.29	0.37	0.53	0.55						
Al_2O_3	14.9	14.06	16.87	13.53	13.08						
CaO	2.52	1.91	2.92	2.29	2.58						
MgO	0.44	0.37	1.19	1.89	1.73						
K ₂ O	3.91	3.9	3.51	3.81	3.86						
Na ₂ O	3.6	3.38	3.75	2.47	2.37						
MnO	0.1	0.08	0.06	0.08	0.08						
P_2O_5	0.07	0.07	0.1	0.15	0.15						
Total	99.17	99.15	99.05	99.12	99.36						
ALK	7.51	7.28	7.26	6.28	6.23						
$Na_2 O/K_2 O$	0.92	0.87	1.07	0.65	0.61						
A/CNK	1.007	1.059	1.104	1 094	1.024						
Ma [#]	61.75	54 58	76.85	77.93	80.13						
Ia	35.5	103	27.7	41.2	43.6						
La	84.6	187	50.8	81.2	86.5						
Pr	11.5	20.9	5 71	9.12	9 71						
Nd	47.1	20.9	20.5	32.8	34.1						
Sm	9.56	11.70	5.28	5 78	5.88						
5m Fu	1.05	2 20	0.96	0.04	0.82						
Eu C-l	7.91	2.29	0.90	0.94	0.82						
Gu	1.01	8. <i>32</i>	4.25	4.75	4.04						
1D De	1.57	6.00	0.47	0.8	0.79						
Dy	1.34	0.99	2.49	4.29	4.04						
FI0	1.49	2.69	0.5	0.85	0.79						
Er	4.13	5.08	0.24	2.29	2.19						
Im	0.69	0.6	0.24	0.38	0.38						
Y D	4.24	3.85	1.51	2.42	2.42						
Lu	0.65	0.61	0.24	0.39	0.36						
Y NDEE	38.6	33.8	13.8	22.2	21.5						
2,REE	256.70	458.40	133.06	209.37	217.72						
LREE	190.21	397.59	109.6	1/1.04	180.61						
HREE	27.92	27.01	9.66	16.13	15.61						
w(LREE)/w(HREE)	6.81	14.72	11.35	10.6	11.57						
$[w(La)/w(Yb)]_{N}$	5.64	26.75	18.34	17.02	18.02						
δEu	0.67	0.6/	0.98	0.53	0.46						
δCe	1.00	0.92	0.92	0.97	0.97						
Li	41.8	16.1	37.8	58.1	57.2						
Ga	21.6	19.5	20.7	17.6	17.6						
Rb	102	125	138	152	152						
Sr	357	222	354	218	225						
Nb	11.6	14.3	9.23	12.9	13.2						
Ba	1089	1277	815	813	890						
Ta	0.77	1	0.82	1.19	1.13						
Th	5.1	19.7	9.45	19.5	18.7						
Zr	270	496.3	157	194	184						
Sn	2.6	2.3	1.8	2.4	2.9						
Se	0.03	0	0.02	0.06	0.03						
w(Nb)/w(Ta)	15.06	14.30	11.26	10.84	11.68						
$w(\operatorname{Rb})/w(\operatorname{Sr})$	0.29	0.56	0.39	0.70	0.68						
w(La)/w(Nb)	3.06	7.2	3.0	3.19	3.3						

注:主量元素单位为 10⁻²,微量、稀土元素单位为 10⁻⁶;ALK=K₂O+Na₂O,A/CNK=Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O),分子比;Na₂O/K₂O 为含量 比;Mg[#]=100×(MgO/40.31)/(MgO/40.31+Fe₂O₃^T×2/159.7),摩尔质量比。



图 5 $w(SiO_2)-w(K_2O)$ 图解(a)和 ANK-A/CNK 图解(b) Fig.5 Diagram of $w(SiO_2)-w(K_2O)$ (a) and ANK-A/CNK(b)

小,介于13.08%~16.87%间,铝饱和指数 A/CNK 值 为1.09~1.15,碱总量(NK 值)较高,DI 值反映岩浆 结晶分异程较低;里特曼指数σ值为1.5~2.6,属钙 碱性系列。在 ANK-A/CNK 图解中,投影点均落于 弱过铝质区域(图 5b)。因此,阳康地区花岗闪长岩 属弱过铝质、高钾钙碱性系列。

3.2.2 稀土元素

岩石样品稀土总量 Σ REE = 133.06×10⁻⁶ ~ 458.40×10⁻⁶,平均260.67×10⁻⁶,其中轻稀土总量109.6×10⁻⁶ ~ 397.59×10⁻⁶,重稀土总量9.66×10⁻⁶ ~ 27.92×10⁻⁶,w(LREE)/w(HREE)为6.81~14.72,LREE 相对富集,HREE 相对亏损。[w(La)/w(Yb)]_N为5.64~26.75, δ Eu值为0.46~0.98,具有负异常,揭示了斜长石经历了分离结晶作用。在球粒陨石标准化稀土配分模式图上,配分曲线显示出明显右倾(图6a),轻重稀土元素分馏明显。 Σ REE

高于上地壳值 168.37^[33],δCe 介于 0.92~1.0 之间, 平均 0.96,接近原始地幔 δCe 值(δCe=1.00)^[8]。 3.2.3 微量元素

花岗闪长岩原始地幔标准化微量元素蛛网图显示(图 6b),微量元素的配分模式近似一致。微量元素含量与同中国花岗闪长岩元素丰度^[34]相比,仅是Sr、Cr低于平均值,其他元素均高于平均值。其中w(K)/w(Rb)值为195.12~232.12,w(Rb)/w(Sr)值为0.76~0.90,均属刘英俊等^[35]划分的同熔型花岗岩。相对于原始地幔,微量元素表现出了富集 Ba、Rb等大离子亲石元素和活泼的不相容元素 Th 的特征,同时富集极不相容元素 Zr,相对亏损 Nb、Ta 等高场强元素,且具有明显的 Sr、Ti、P 的负异常,类似中、上地壳微量元素蛛网图分布模式^[36],并与正常弧花岗质岩石的蛛网图特征基本一致,反映岩石成因与岩浆弧环境相关。



图 6 球粒陨石标准化稀土元素配分模式图解(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b) Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagram of trace elements (b) for the Yangkang granites 4 讨论

4.1 岩体形成时代

笔者对花岗闪长岩岩体进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析,结果表明锆石均为岩浆成因, 其边部年龄代表了岩体的结晶时代,该年龄代表了 锆石 w(²⁰⁶Pb)/w(²³⁸U)年龄介于 440~448 Ma,加权 平均年龄为 444±1.2 Ma,MSWD=1.14,说明了花岗 闪长岩岩体的形成于晚奥陶世。该年龄与中祁连石 包城花岗岩(435±4 Ma)^[37]及南祁连北段刚查大寺 组花岗闪长岩年龄(435±4 Ma)相近,与中祁连湟源 新店黑云母二长花岗岩(446±1 Ma)^[38]、南祁裕龙 沟黑云角闪辉石岩(442±2 Ma)^[39]及车路沟岩体 (446±3 Ma)^[40]年龄相一致,反映了中南祁连地区 在晚奥陶世至早志留世存在一期岩浆事件^[41]。

4.2 岩石成因类型及源区性质

花岗岩的成因类型,目前大多数地质学者最常用的分类方案是将其划分为 I 型、S 型、A 型及 M 型^[42]。暗色矿物(角闪石、堇青石、碱性暗色矿物) 是区分 I 型、S 型及 A 型的矿物学标志,阳康地区花 岗闪长岩具有角闪石及黑云母等暗色矿物,矿物学 角度显示其 I 型花岗岩特征。研究表明^[43],铝饱和 指数(A/CNK)是区分 I 型、S 型花岗岩重要的地球 化学参数, I 型A/CNK值<1.1,S型A/CNK值> 1.1,阳康地区花岗岩岩体 A/CNK 值为 1.007~ 1.104,

除 Pm 17-7外,其余4个样品的A/CNK值均小于 1.1,样品全部落入弱过铝质范围,显示 I型花岗岩 成因类型特征。此外,磷灰石的含量作为一重要指 标,用于区分 I型及 S型花岗岩^[44-47],阳康地区花 岗岩 P₂O₅ 含量 0.07~0.15,明显低于 S型花岗岩所 具 P₂O₅ >0.2 的特征^[48],w(FeO^{*})/w(MgO)比值 (FeO^{*}代表氧化铁及氧化亚铁总量,下同)为 2.45~ 9.92,不具 A型花岗岩w(FeO^{*})/w(MgO)>10^[49]的 富铁特征。综上,阳康地区花岗岩为 I型花岗岩。

阳康地区花岗岩具有高硅、高碱、贫镁、贫铁的 特征,富集 LREE、LILE 元素(K、Ba、Rb)和活泼的不 相容元素 Th,亏损 HFSE 元素(Ta、Nb、Ti),显示壳 源的地球化学属性。其中 w(Nb)/w(Ta)值为 10.84~15.06,平均12.60,接近上地壳值(w(Nb)/w (Ta)=10);w(Rb)/w(Sr)为0.29~0.70,平均0.53, 接近大陆地壳值(w(Rb)/w(Sr)=0.32)。样品中 Zr 元素的富集,也暗示源区的壳源性质。在 w (La)/w(Sm)-w(La)图解中(图7),w(La)/w(Sm) 比值与 La 值呈正相关关系,说明岩浆侵位过程中, 以部分熔融作用为主,并伴随一定程度的分离结晶, 但结晶分异作用相对较弱。样品中 Sr、Eu 的亏损, 说明岩浆源区有残留的斜长石,P、Ti 的亏损显示源 区有残留的磷灰石、钛铁矿等物质。

综上所述,本次花岗闪长岩地球化学特征显示 为壳源物质部分熔融的产物。



4.3 构造环境

花岗岩类型不仅可以指示动力学环境,而且也 能作为动力学演变过程的示踪物,指示动力学的演 变过程[50]。花岗闪长岩作为高钾钙碱性岩类,它的 出现指示了一种构造体系的变化,其岩石地球化学 特征很好地映证了这一点。阳康地区花岗闪长岩以 富 Si、Al、K,贫 Mg、Fe、Ti,富集 LILE 和 LREE,亏损 HFSE 和 HREE 为特征,显示岛弧和大陆边缘花岗 岩特点。在构造环境判别的 w(Nb)-w(Y) 图中(图 8a),样品落入火山弧和同碰撞花岗岩范围;w(Rb)w(Y)+w(Nb)图解中图中(图 8b),样品落入火山弧 花岗岩区域,显示火山弧和同碰撞的环境。综合岩 石为高钾钙碱性岩石的特点,且并未出现低钾系列, 以上分析,表明阳康地区花岗岩总体显示活动大陆 边缘的构造背景[51]。同期的岩浆事件在南祁连构 造带广泛发育,如柴达木盆地北缘都兰地区旺尕秀 岛弧型辉长岩(468~522 Ma)^[52]、440~470 Ma 洋内 弧火山岩^[53]以及 445~514 Ma 滩间山群弧火山— 沉积序列。结合柴达木北西段的敖包山—吕梁山地 区的钙碱性 I 型花岗岩(445~496 Ma)^[54]以及党河 南山地区奥陶纪的大道尔吉俯冲带型蛇绿岩[55]等 岩浆记录都反映了该时期南祁连洋壳的北向俯冲, 暗示该时期区域上应为活动大陆边缘构造环境。

该地区的构造背景表明^[56-57],早奧陶世晚期之 后,中--南祁连的扩张体制逐渐转化为俯冲消减体 制;到早志留世时,中—南祁连间由于大洋板块向深 部俯冲,深部洋壳发生高温脱水熔融,熔融的熔体交 代上覆地幔橄榄岩,沿深大断裂继续上升至地壳,同 时与周围岩石发生物质交换,进而发生部分熔融形 成阳康地区花岗岩。最终在晚志留世—晚泥盆世 时,中—南祁连完成拼贴和碰撞^[2]。



5 结论

1) 阳康地区花岗闪长岩中锆石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄介于 440~448 Ma,加权平均年龄为 444±1.2 Ma(MSWD=1.14),该年龄为代表了岩体的 结晶年龄,属奥陶纪晚期。

2) 阳康地区花岗闪长岩以高硅、高碱、贫镁、贫铁的特征,富集 LREE 元素、LILE 元素(K、Ba、Rb)和活泼的不相容元素 Th,亏损 HREE 和 HFSE 元素(Ta、Nb、Ti),具 Sr、Eu 的负异常,亏损 P、Ti,具有 I型花岗岩的地球化学属性,其为 I型花岗岩。

3)阳康地区花岗闪长岩是地壳部分熔融的产物,形成于活动的大陆边缘构造环境。

参考文献(References):

[1] 李文渊.祁连山主要矿床组合及其成矿动力学分析[J].地球学报,2004,25(3):313-320.

Li W Y. Main mineral deposit associations in the Qilian mountains and their metallogenic dynamics [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2004, 25(3): 313 - 320.

- [2] 刘志武,王崇礼,石小虎.南祁连党河南山花岗岩类特征及其构造环境[J].现代地质,2006,20(4):545-554.
 Liu Z W, Wang C L, Shi X H.Granitoids characteristics and tectonic setting of Danghenanshan area in South Qilian Mountains[J].
 Geoscience,2006,20(4):545-554.
- [3] 夏林圻,夏祖春,彭礼贵,等.北祁连山石灰沟奥陶纪岛弧火山岩 系岩浆性质的确定[J].岩石矿物学杂志,1991,10(1):1-10.

Xia L Q, Xia Z C, Peng L G, et al. Determination of magmatic nature of ordovician island arc volcanic series in the Shihuigou area in the Northern Qilian Mountains[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1991,10(1):1-10.

[4] 左国朝,张淑玲,程建生,等.祁连地区蛇绿岩带划分及其构造 意义[C]//蛇绿岩与地球动力学研讨会论文集,1996:129-134.

Zuo G C, Zhang S L, Cheng J S, et al. Division of ophiolite zones and their tectonic significance in Qilian area[C]// Symposium on Ophiolites and Geodynamics, 1996;129 – 134.

[5] 邱家骧,张珠福.北秦岭早古生代海相火山岩的实验、成分与构造开合[J].地球科学:中国地质大学学报,1997,22(3):233-239.

Qiu J X, Zhang Z F. Experiment, composition and tectonic opening closing of early palaeozoic marine volcanic rocks from northern Qinling mountains, China[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 1997, 22(3):233 – 239.

[6] 侯青叶,张宏飞,张本仁,等.祁连造山带中部拉脊山古地慢特 征及其归属:来自基性火山岩的地球化学证据[J].地球科学: 中国地质大学学报,2005,30(1):61-70.

Hou Q Y, Zhang H F, Zhang B R, et al. Characteristics and tectonic affinity of Lajishan paleo-mantle in Qilian orogenic belt: A geochemical study of basalts [J]. Earth Science: Journal of China Universilty of Geosciences, 2005, 30(1):61 – 70.

- [7] 王二七,张旗.青海拉鸡山:一个多阶段抬升的构造窗[J].地质科学,2000,35(4):493-500.
 Wang E Q,Zhang Q. The Lajishan fault belt in Qinghai province: A multi-staged upliftingstructural window[J].Scientia Geologica Sinica, 2000, 35(4):493-500.
- [8] 闫臻,王宗起,李继亮,等. 西秦岭楔的构造属性及其增生造山 过程[J].岩石学报,2012, 28(6): 1808-1828.

Yan Z, Wang Z Q, Li J L, et al. Tectonic settings and accretionary orogenesis of the West QinlingTerrane, northeastern margin of the Tibet Plateau [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(6): 1808 – 1828.

- [9] Song S G, Wang M J, Wang C, et al. Magmatism during continental collision, subduction, exhumation and mountain collapse in collisional orogenic belts and continental net growth: A perspective [J]. Science China;Earth Sciences, 2015, 58(8): 1284-1304.
- [10] 夏林圻,李向民,余吉远,等.祁连山新元古代中—晚期至早古
 生代火山作用与构造演化[J].中国地质,2016,43(4):1087-1138.

Xia L Q, Li X M, Yu J Y, et al. Mid-late Neoproterozoic to early Paleozoic volcanism and tectonic evolution of the Qilian Mountain [J]. Geology in China, 2016, 43(4): 1087-1138.

- [11] Kang H, Chen Y L, Li D P, et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions of fluvial sediments from the Huangshui, Beichuan, and Xichuan rivers, Northwest China: Constraints on the formation and evolution history of the Central Qilian Block [J]. Geochemical Journal, 2018, 52: 37 – 57.
- [12] Kang H, Chen Y L, Li D P, et al. Detrital zircon record of rivers' sediments in the North Qilian orogenic belt: Implications of the tectonic evolution of the northeastern Tibetan Plateau[J]. Geological Journal, 2019, 54(4): 2208-2228.
- [13] Kang H, Chen Y L, Li D P. The nature and history of the South Qilian orogenic belt: Constraints from compositions of rivers' sediments and their detrital zircon U-Pb geochronology, Lu-Hf isotopic compositions [J]. Geological Journal, 2020, 55(1): 712-727.
- [14] 李兆,陈岳龙,刘长征,等.北祁连的形成与演化历史:来自河流 沉积物地球化学及其碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成的证 据[J]. 地质学报, 2016,90(2): 267-282.
 Li Z, Chen Y L, Liu C Z, et al. Formation and evolution history on the Northern Qilian orogen: The evidences from compositions of riv-

ers, sediments and their zircon U-Pb ages, Hf isotopic compositions [J]. Acta Geologiva Sinica, 2016,90(2): 267-282.

[15] 肖序常,陈国铭,朱志直.祁连山古蛇绿岩带的地质构造意义 [J]. 地质学报,1978(4):282-296.

Xiao X C, Chen G M, Zhu Z Z. A preliminary study on the tectonics of ancient ophiolites in the Qilian mountain, Northwest China [J]. Acta Geologiva Sinica, 1978(4): 282 – 296.

- [16] 许志琴,徐惠芬,张建新,等. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩 增生地体及其动力学[J].地质学报,1994,68(1):1-15.
 Xu Z Q, Xu H F, Zhang J X, et al. The Zhoulangnanshan caledonian subductive complex in the Northern Qilian mountains and its dynamics[J]. Acta Geologiva Sinica,,1994,68(1):1-15.
- [17] 张建新,许志琴,徐惠芬,等. 北祁连加里东期俯冲—增生楔结构及动力学[J].地质科学, 1998,33(3): 290-299.
 Zhang J X, Xu Z Q, Xu H F, et al. Structure and dynamics of caledonian subduction accretion wedge in North Qilian[J]. Geological Science, 1998,33(3): 290-299.
- [18] 李春昱,刘仰文,朱宝清,等. 秦岭及祁连山构造发展史[J].西 北地质, 1978:1-12.
 Li C Y, Liu Y W, Zhu B Q, et al. Tectonic development history of Qinling and Qilian Mountains[J]. Northwestern Geology, 1978:1

- 12.

- [19] 吴才来,徐学义,高前明,等.北祁连早古生代花岗质岩浆作用 及构造演化[J].岩石学报,2010,26(4):1027-1044.
 Wu C L,Xu X Y, Gao Q M, et al. Early Palaezoic grranitoid magmatism and tectonic evolution in North Qilian, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010,26(4);1027-1044.
- [20] 陈隽璐,徐学义,曾佐勋,等.中祁连东段什川杂岩基的岩石化 学特征及年代学研究[J].岩石学报,2008,24(4):841-854.
 Chen J L, Xu X Y, Zeng Z X, et al. Geochemical characters and LA-ICPMS zircon U-Pb dating constraints on the petrogenesis and tectonic setting of the Shichuan intrusion, east segment of the Central Qilian, NW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24 (4):841-854.
- [21] 雍拥,肖文交,袁超,等.中祁连东段古生代花岗岩的年代学、地 球化学特征及其大地构造意义[J].岩石学报,2008,24(4): 855-866.

Yong Y, Xiao W J, Yuan C, et al. Geochronology and geochemistry of Paleozoic granitic plutons Prom the eastern central and their tectonic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008,24(4): 855 - 866.

[22] 李建锋,张志诚,韩宝福.中祁连西段肃北、石包城地区早古生 代花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J].岩石学报, 2010,26(8):2431-2444.
LI J F, Zhang Z C, Han B F. Geochro-nology and geochemistry of early Paleozoic from Subei and Shibaocheng areas, the western

early Pateozoic from Subei and Shibaocheng areas, the western segment of central Qilian and their geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010,26(8): 2431 – 2444.

- [23] 郭进京,赵凤清,李怀坤,等.中祁连东段涅源群的年代学新证据及其地质意义[J].中国区域地质,2000,19(1):26-31.
 Guo J J, Zhao F Q, LI H K, et al. New chronological evidence of the age of Huangyuan group in the eastern segment of Mid-Qilian massif and its geological significance[J].Regional Geology of China, 2000,19(1):26-31.
- [24] 余吉远,李向民,马中平,等.南祁连乙什春基性一超基性岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].高校地质学报, 2012,18(1):158-163.

Yu J Y, LI X M, Ma Z P, et al. Zircon U-Pb dating of the Yishichun mafic-ultramafic complex from Southern Qilian and its geological significance [J]. Geological Journal of China Universities, 2012,18(1):158-163.

- [25] 张照伟,李文渊,高永宝,等.青海化隆基性—超基性岩带铜镍 矿成矿条件与找矿潜力[J].西北地质,2012,45(1):140-148. Zhang Z W,Li W Y,Gao Y B, et al. Ni-Cu mineralization conditions of Hualong basic-ultrabasic rocks belt in Qinghai Province and lits prospecting potentiality[J]. Northwestern Geology,2012, 45(1):140-148.
- [26] 郭周平,李文渊,张照伟,等.南祁连化隆地区鲁满山花岗岩的 岩石成因:地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素约束[J]. 中国地质,2015,42(4):864-880.
 Guo Z P, Li W Y, Zhang Z W, et al. Petrogenisis of Lumanshan

granites in Hualong area of southern Qilian Mountain: Constraints from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotope[J]. Geology in China, 2015, 42(4): 864-880.

[27] 付长全,闫臻.拉脊山蛇绿混杂带结构组成、形成时代与形成过 程[J].地球学报,2017,38(S1):29-32.

Fu C L, Yan Z. The composition, age and tectonic setting of Lajishan ophiolite melange [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38 (S1): 29-32.

- [28] 周志强,曹宣铎,赵江天,等.祁连山东部早古生代地层和沉积—构造演化[J].西北地质科学,1996,17(1):1-58.
 Zhou Z Q,Cao X D, Zhao J T, et al. Early palaeozoic stratigraphy and sedimentary-tectonic evolution in Eastern Qilian mountains, China[J]. Northwest Geoscience, 1996,17(1):1-58.
- [29] 林天瑞,彭善池,周志强,等.青海化隆拉脊山寒武纪多节类三 叶虫[J].古生物学报,2013,52(4):424-458.
 Lin T R, Peng S C, Zhou Z Q et al. Cambrian polymerid trilobites from the nidanshan and liudaogou groups, Hualong, Northestern Qinghai, China[J]. Acta Palacontologica Sinica, 2013,52(4): 424-458.
- [30] 林天瑞,彭善池,周志强. 青海化隆拉脊山寒武纪球接子类三 叶虫[J].古生物学报,2015,54(2):184-206.
 Lin T R, Peng S C, Zhou Z Q. Cambrian agnostoid trilobites from the nidanshan and liudaogou groups, Hualong, Northeastern Qinghai, China[J]. Acta Palacontologica Sinica, 2015, 54(2):184-206
- [31] Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J].Geostandards and Geoanalytical Research, 2004, 28(3): 353 – 370.
- [32] Liu Y. Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements oI anhydrous minerals by IA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008,257(1):34-43.
- [33] Taylor S R, Mclennan S M.The geochemical evolution of the continental crust[J].Reviews of Geophysics, 1995, 33(2):241-265.
- [34] 鄢明才,迟清华.应用地球化学元素丰度数据手册[M].北京: 地质出版社,2007.

Yan M C, Chi Q H. Handbook of applied geochemical element abundance data[M].Beijing:Geological Publishing House, 2007.

[35] 刘英俊,曹励明.元素地球化学导论[M].北京:地质出版社, 1993.

Liu Y J, Cao L M.Introduction to element geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.

- [36] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [J]. Treatise on Geochemistry: Second Edition, 2014,4:1-51.
- [37] 李建锋,张志诚,韩宝福.中祁连西段肃北、石包城地区早古生 代花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J].岩石学报, 2010,26(8):2431-2444.

Li J F, Zhang Z C, Han B F. Geochronology and geochemistry of early Paleozoic granitic plutons from Subei and Shibaocheng areas, the western segment of central Qilian and their geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(8):2431-2444.

[38] 雍拥,肖文交,袁超,等.祁连东段花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[[J].新疆地质,2008,26(1):62-70.

Yong Y, Xiao W J, Yuan C, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of granitic plutons from the eastern sector of the central Qilian and their geologic implication[J]. Xinjiang Geological, 2008,26(1): 62 - 70.

[39] 高永宝,李文渊,张照伟,等.南祁连裕龙沟铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位索物质来源>1s示踪研究[[J].地球学报,2012,33 (6):899-906.

Gao Y B, Li W Y, Zhang Z W, et al. Re-Os isotopic analysis of the Yulonggou Cu-Ni sulfide deposit in the South Qilian Mountain [J].Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33(6):899-906.

- [40] 贾群子,杨忠堂,肖朝阳.祁连山铜金钨铅锌矿床成矿规律和成 矿预测[Ml.北京:地质出版社,2007.
 Jia Q Z, Yang Z T, Xiao C Y. The metallogenic regularity and metallogenic prediction of copper,gold and tungsten deposits in Qilian mountain[M].Beijing:Geological Publishing House,2007.
- [41] 毛景文.北祁连山西段铜金铁钨多金属矿床成矿系列和找矿评价[M].北京:地质出版社,2003.

Mao J W. The copper, gold, iron and tungsten poly-metallic metallogenic series of ore deposits and prospecting evaluation in orthwestern Qilian mountain [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003.

[42] 吴福元,李献华,杨进辉,等.花岗岩成因研究的若干问题[J].
 岩石学报,2007,23(6):1217-1238.
 Wu F Y,Li X H, Yang J H, et al. Discussions on the petrogenesis

of granites[J]. Acta Sinica, 2007,23(6):1217-1238. [43] 韦龙猛,杨一增,张贺,等.南秦岭胭脂坝花岗岩成因:钻石 U-Pb 年龄、地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位索的制约[J].地球科学与

环境学报,2016,38(4):527-546. Wei L M, Yang Y Z, Zhng H, et al.Petrogenesis of Yanzhiba granite in South Qinling: Constraints from zircon U-Pb ages, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotope[J].Journal of Earth Sciences and Environment, 2016,38(4):527-546.

- [44] Altherr R, Holia, Hegner E, et al. High-potassium, calc-alkaline Itype plutonism in the European Variscides: North Vosges(France) and northern Schwarzwald (Germany) [J]. Lithos, 2000, 50(1): 51-73.
- [45] Wu F Y, Jann B M, Wilde S A, et al. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis [J]. Lithos, 2003, 66(3/4): 241 – 273.
- [46] Li X H,Li Z X,Li W X,et al. Initiation of the indosinian urogcny in South China; Evidence for a Per-main magmatic arc on Hainan Isiand[J]. The Journal of Geology, 2006,114(3):341-353.
- [47] Li X H, Li Z X, Li W X, et, al. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab[J]. Lithos, 2007;18(9):186-204.
- [48] Chappell B W.Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites [J].Lithos, 1999, 46(3):535-551.
- [49] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W.A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95(4):407-419.
- [50] 肖庆辉,邓晋福,邱瑞照,等.花岗岩类与大陆地壳生长初 探——以中国典型造山带花岗岩类岩石的形成为例[J].中国 地质,2009,36(3):594-621.

Xiao Q H, Deng J F, Qiu R Z, et al. A preliminary study of the relationship between granitoids and the growth of continental crust: A case study of the formation of key orogen granitoids in China[J]. Geology in China, 2009, 36(3):594-621.

[51] 陆凤香,桑隆康. 岩石学[M].北京:地质出版社,2002:373-380.

Lu F X, Sang L K. Petrology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002:373 – 380.

[52] 朱小辉,陈丹玲,刘良,等. 柴北缘绿梁山地区早古生代弧后盆 地型蛇绿岩的年代学、地球化学及大地构造意义[J]. 岩石学 报,2014,30(3):822-834.

Zhu X H, Chen D L, Liu L, et al. Geochronology, geochemistry and significance of the early Paleozoic back-arc type ophiolite in Lvliangshan area, North Qaidam [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(3):822-834.

[53] 杨巍然,邓清禄,吴秀玲.南祁连拉脊山造山带基本特征及大地 构造属性[J].地质学报, 2002, 76(1):106.

Yang W R, Deng Q L, Wu X L. The basic characteristics and tectonic attributes of the Lajishan orogenic belt in South Qilian [J]. Acta Geologiva Sinica, 2002, 76(1):106.

- [54] 吴才来,杨经绥,Wooden J,等.柴达木山花岗岩锆石 SHRIMP 定年[J].科学通报, 2001,46(20):1743-1747.
 Wu C L, Yang J S, Wooden J, et al. SHRIMP dating of zircon from Qaidamshan granite[J]. Chinese Science Bulletin, 2001,46 (20):1743-1747.
- [55] 黄增保,郑建平,李葆华,等.南祁连大道尔吉早古生代弧后盆 地型蛇绿岩的年代学、地球化学特征及意义[J].大地构造与 成矿学, 2016,40(4):826-838.
 Huang Z B, Zheng J P, Li B H, et al. Age and geochemistry of the early Paleozoic back-arc type ophiolite in Dadaoerji area, South Qilian, China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2016,40 (4):826-838.
- [56] Song S G, Niu Y L, Zhang L R, et al. Tectonic evolution of early Paleozoic HP metamorphic rocks in the north Qilian mountains, NW China: New perspectives [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009,35:334 - 353.
- [57] Song S G, Niu Y L, Su L, et al. Tectonics of the north Qilian orogen, NW China [J] Gondwana Research, 2013, 23 (4): 1378 – 1401.

Geochronology and geochemistry of the granodiorite intrusion in Yangkang area of Qinghai Province and its geological significance

FANG Yong-Kun^{1,2,3,4}, Cao Cheng-Gang^{1,2,3,4}, DONG Jun-Lin⁵, LI Ling-Gui⁵

(1.Qinghai Environmental Geological Exploration Bureau, Xining 810000, China; 2. No. 906 Engineering Survey and Design Institute of Qinghai Province, Xining 810000, China; 3. Key Laboratory of Environmental Geology Qinghai Province, Xining 810000, China; 4. Qinghai Engineering Research Center of Geoenvironment Pritection and Geohazard prevention, Xining 810000, China; 5. No. 5 Geological and Mineral Survey Institute of Qinghai Province, Xining 810000, China)

Abstract: The formation age and petrogenesis of the Yangkang granites in the Qilian block remain controversial. In this study, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and whole-rock geochemical analysis were conducted to constrain the petrogenetic and tectonic processes during the formation of the granites. The results show that U-Pb age of granodiorite in Yangkang pluton is 444 ± 1.2 Ma, (MSWD=1.14), indicating that it was formed in the early Late Ordovician and that the rocks belong to weak peraluminous-strong peraluminous I-type granite. The rocks are enriched with large ion lithophile elements (K,Ba, Rb) and Light Rare Earth Elements (LREEs) and Th, but depleted in the high field strength elements (e.g., Ta-Nb). The above results show that Yangkang granites were derived from partial melting of continental crust. Combined with the regional data, the authors suggest that the Yangkang granites were probably formed in an active continental margin during Late Ordovician.

Key words: late Ordovician; zircon U-Pb dating; rock geochemistry; Yangkang granite; south Qilian block

(本文编辑:蒋实)