

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.02.002

青海南山构造带东段化隆岩群中变质侵入体的形成时代及地球化学特征

吴树宽,张元,杨启安,吴金宏,何利,马国骅,李春斌,朵高德

(青海省第五地质勘查院,青海 西宁 810003)

摘要:化隆岩群作为青海南山构造带的基底岩系,对其形成时代还存在较大争议。笔者通过对侵入于华隆岩群的片麻状花岗岩进行岩石学、年代学和岩石地球化学研究,显示岩石具高硅、富铝、贫钾、低磷和钛的特征, SiO_2 含量为69.48%, K_2O 含量为2.35%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为0.59, $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 值为6.27%, MgO 含量为1.32%, Al_2O_3 含量为13.68%,属中钾钙碱性过铝质系列。稀土元素含量较低, ΣREE 为 253.77×10^{-6} ,岩石稀土元素配分曲线表现为轻稀土元素富集的右倾型,具中等程度的Eu负异常。微量元素显示富集大离子亲石元素Th、U、Ba,与相邻元素相比,明显亏损K、P、Ti元素,相对亏损Rb、Sr,具Zr、Hf正异常,具有A型花岗岩特征。片麻状花岗岩的形成时代为 $(701 \pm 63) \text{ Ma}$ 。结合地球化学特征及区域岩浆活动事件,认为化隆岩群片麻状花岗闪长岩形成于板内伸展环境,是罗迪尼亚超大陆裂解事件在祁连陆块中的岩浆活动响应。

关键词:化隆岩群;锆石U-Pb定年;地球化学;片麻状花岗闪长岩;祁连陆块

中图分类号:P597.3

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2021)02-0019-11

The Forming Age and Geological Characteristics of the Metamorphic Intrusion of Hualong Rock Group in the Eastern Tectonic Belt of Nanshan, Qinghai

WU Shukuan, ZHANG Yuan, YANG Qi'an, WU Jinhong, HE Li, MA Guohua,
LI Chunbin, DUO Gaode

(The Fifth Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Xining 810003, Qinghai, China)

Abstract: Hualong rock group is the basement rock of Nanshan tectonic belt in Qinghai province. Its formation age remains controversial. This paper studied the gneissic granodiorite, which intruded into Hualong rock group, through petrology, chronology and petrogeochemistry. The research shows that the rock has high SiO_2 and Al_2O_3 , and low K, P, Ti. The content of SiO_2 is 69.48%, of K_2O , 2.35%, of $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$, 0.59, of $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, 6.27%, of MgO , 1.32%, of Al_2O_3 , 13.68%, belonging to mid-K calc-alkaline and prealuminous series. The content of rare earth elements is lower, ΣREE being 253.77×10^{-6} . The rock is enriched in LREE and depleted in HREE. The REE patterns show rightward incline and moderate negative Eu anomaly. Compared with the adjacent elements, the trace elements show enrichment of LILE (Th, U,

收稿日期:2020-03-06;修回日期:2020-12-03

基金项目:中国地质调查局项目“青海省共和县东巴地区三幅1:5万区域地质矿产调查”(12120113033020)。

作者简介:吴树宽(1986-),男,硕士,高级工程师,从事区域地质调查及矿产勘查工作。E-mail:wushukuan@126.com。

Ba), evident depletion of K, P, Ti, and relative depletion of Rb, Sr, Zr and Hf were positive anomaly. The rock has the characteristics of A-type granite with the forming age of (701 ± 63) Ma. Combined with the geochemical characteristics and regional magmatic activity events, it is held that the gneissic granodiorite was generated in an extensional environment, being the magmatic activity of the Rodinia supercontinent cracking event in Qilian block.

Keywords: Hualong rock group; zircon U-Pb dating; geochemistry; gneissic granodiorite; Qilian block

共和盆地为一新生代盆地(常宏等,2009),其作为西秦岭-松潘大陆构造结中次一级的西南构造结点,处于西秦岭、东昆仑、祁连、柴达木及欧龙布鲁克等多个构造及块体交接转换的重要结点地区(张国伟等,2004)。而青海南山构造带位于共和盆地北缘,是衔接宗务隆构造带、南祁连构造带和西秦岭造山带的重要构造单元。该构造带是在前寒武纪基底(包括化隆岩群)之上发育的一条呈北西-南东向展布的构造岩浆岩带。研究区位于构造带东段,众多学者对显生宙以来,在前寒武基底基础之上发生的岩浆活动等事件进行了大量研究(李生虎等,2018;张永明等,2017;田琪等,2015),对其构造演化历史研究奠定了一定的基础。但是对该区基底的形成时代及当时所处的构造背景仍存在一些争议。如对于化隆群的形成时代,部分学者认为形成于新太古代-古元古代(郭进京等,1999;徐学义等,2008);还有学者认为是中-古元古代(陆松年等,2009);另有学者认为形成于新元古代(万渝生等,2003;徐旺春等,2007;何世平等,2011;余吉远等,2012;邱成贵等,2016年;康伟浩等,2016)。笔者通过对研究区内化隆岩群中新元古代侵入体开展了年代学和地球化学方面的研究,对基底形成时代和构造背景的研究具有一定的地质意义。

1 地质背景及岩体地质特征

1.1 研究区地质概况

研究区内出露的地层时间跨度大,岩石类型较为复杂。出露的岩石地层单位主要有:古元古界化隆(岩)群、下二叠统果可山组(P_1g)、下三叠统隆务河组(T_1l)及广泛分布的第四系。其中化隆岩群依据岩石组合分为3个岩组,分别为大理岩岩组、变粒岩岩组、片麻岩岩组。区内岩浆活动频繁,仅表现岩浆侵入活动,未见火山岩发育,岩浆活动具有多期次

性,最早可追溯到新元古代,经历了加里东期、华力西期及印支期等构造岩浆旋回,以加里东期和印支期为主,时代跨度大(图1)。

1.2 岩体地质特征

片麻状花岗闪长岩是在研究区化隆岩群中新解体出来的变质侵入体,区内仅出露1处,位于研究区的中东部,呈岩株产出,出露面积为 1.4 km^2 ,形态呈北西向不规则带状,侵位于化隆岩群变粒岩组中,侵入界线不清晰,界面呈波状弯曲,外倾,倾角中等,发育与围岩方向一致的片麻理被后期近东西向断裂构造错断。该侵入体岩石类型单一,岩性为片麻状花岗闪长岩,呈鳞片柱粒状变晶结构,片麻状构造,岩石主要由石英26%、斜长石47%、钾长石16%、黑云母9%、角闪石2%及少量的金属矿物2%组成。岩石中的斜长石被拉长并定向,部分斜长石具一定绢云母化和帘石化,帘石以细粒状集合体的形式产出,可见斜长石明显的晶形及其聚片双晶特征;钾长石呈他形粒状分布,后期具黏土化;石英与钾长石呈他形粒状镶嵌结构;黑云母呈他形不规则鳞片状,以集合体形式分布于矿物颗粒之间,大部分黑云母后期被绿泥石交代,局部可见交代残留的微晶黑云母;金属矿物呈他形-不规则粒状,呈零星状分布。

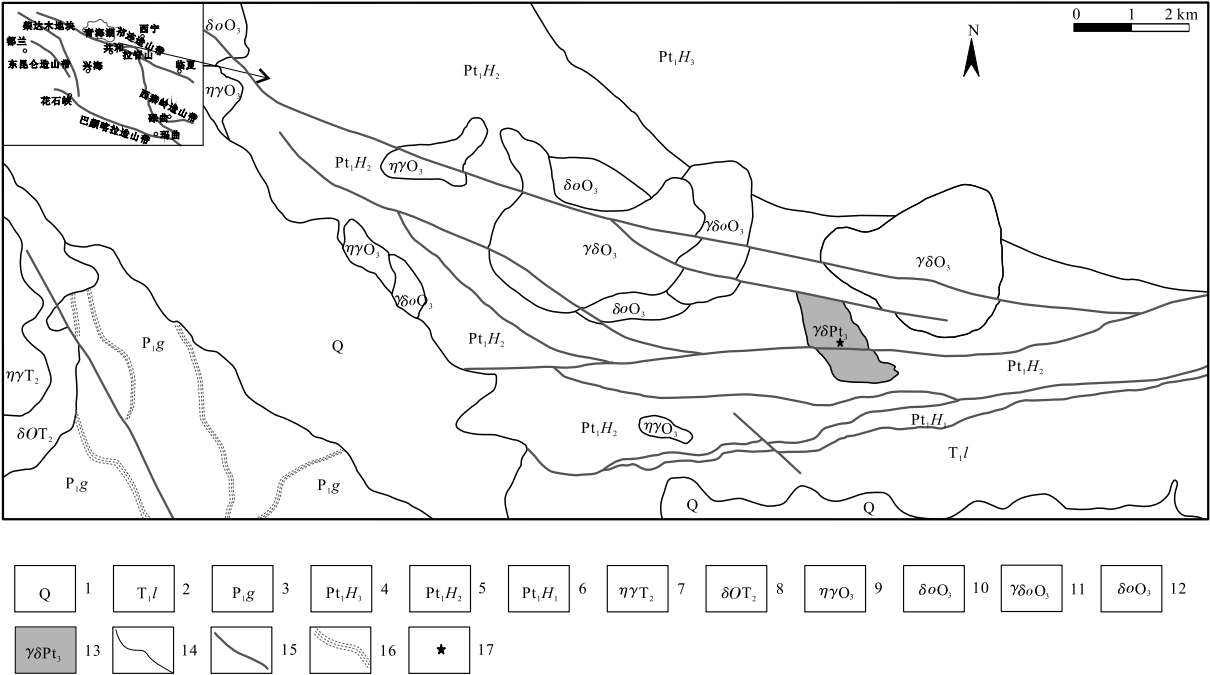
2 样品采集及分析方法

笔者研究的样品(YP01)采自于研究区片麻状花岗闪长岩中,采样坐标为 $N 36^{\circ}26'43''$ 、 $E 100^{\circ}39'46''$ 。样品采自于野外露头的新鲜岩石,进行了LA-ICP-MS分析和主、微量元素测试。

在片麻状花岗闪长岩样品中分选出锆石,在双目镜下挑选无色透明的、晶形较好的颗粒,用环氧树脂进行固定并抛光,使锆石内部暴露,然后分别进行CL显微照相和了LA-ICP-MS分析。该项实验

在武汉上谱分析科技有限责任公司完成,分析仪器为 Elan 6100DRC 型四极杆质谱仪和 Geolas200M 型激光剥蚀系统,激光器为 193 nm ArF 准分子激光器。激光剥蚀斑束直径为 30 μm 。样品的同位素比值和元素含量数据处理采用 GLITTER(4.0 版,

Macquarie University)程序并采用 Andersen(2002)软件对测试数据进行普通铅校正,年龄计算和成图采用 ISOPLOT 程序。测试前,以锆石阴极发光照片和反射光照片为依据,根据实验目的,在锆石上选取合适的位置进行测试。



1. 第四系;2. 早三叠统隆务河组;3. 早二叠统果可山组;4. 古元古界化隆岩群片麻岩段;5. 古元古界化隆岩群变粒岩段;5. 古元古界化隆岩群大理岩段;7. 中三叠世二长花岗岩;8. 中三叠世石英闪长岩;9. 晚奥陶世二长花岗岩;10. 晚奥陶世石英闪长岩;11. 晚奥陶世英云闪长岩;12. 晚奥陶世石英闪长岩;13. 新元古代侵入岩;14. 地质界线;15. 断裂构造;16. 韧性剪切带;17. 采样位置

图 1 研究区地质简图

Fig. 1 The geological map of the research area

地球化学成分测试在武汉上谱分析科技有限责任公司完成,岩石样品首先粗碎至 2~4 cm,然后用 3%~5% 的稀盐酸经超声波清除表面杂质,再研磨至 200 目。主量元素利用日本理学 Primus II X 射线荧光光谱仪(XRF)分析完成。微量元素利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成。

首先将 200 目样品置于 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干 12 h 后,准确称取粉末样品 50 mg 置于 Teflon 溶样弹中,加入添加剂(1.5 ml 高纯 HNO_3 和 1.0 ml 高纯 HF),按照标准测试程序,反复添加、加热、冷却后,最后在离心管中稀释到 50 ml;将所得溶液在电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)上完成测定,分析精度和准确度优于 10%。

3 锆石 U-Pb 定年

从样品中选取的锆石多为短柱状、长柱状,部分呈不规则状,颜色呈无色透明至淡黄色,CL 图像显示锆石内部结构较为复杂,锆石多数具有明暗相间的条带结构或环带结构,为典型的岩浆韵律环带(图 2)。锆石的 U 含量为 $26.3 \times 10^{-6} \sim 488 \times 10^{-6}$, Th 的含量为 $34.2 \times 10^{-6} \sim 319 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.35~3.13,平均值为 1.06,属岩浆成因锆石(Belousova E et al., 2002)。本次锆石分析共测试了 24 个点,根据分析结果(表 1),锆石年龄比较分散,可分为 3 组,第一组年龄由 14 个测点组成,年龄变化区间为 738~861 Ma 和

1 873~2 213 Ma(其中 4 个测点年龄值较大,测点号分别 7、12、19、23,可能为继承的古元古代的古老年龄),该组年龄中的锆石可能为捕获锆石;第二组由 3 个测点(4、14、24)组成,可能受到多期变质作用的影响导致铅丢失,造成谐和性较差;第三

组年龄由 7 个测点组成,²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄变化于 682~724 Ma,加权平均年龄为(701±63) Ma(图 3),代表了岩体结晶年龄,为新元古代产物。根据岩体与化隆岩群的接触关系,得出化隆岩群的地层年龄下限至少要早于 701 Ma。

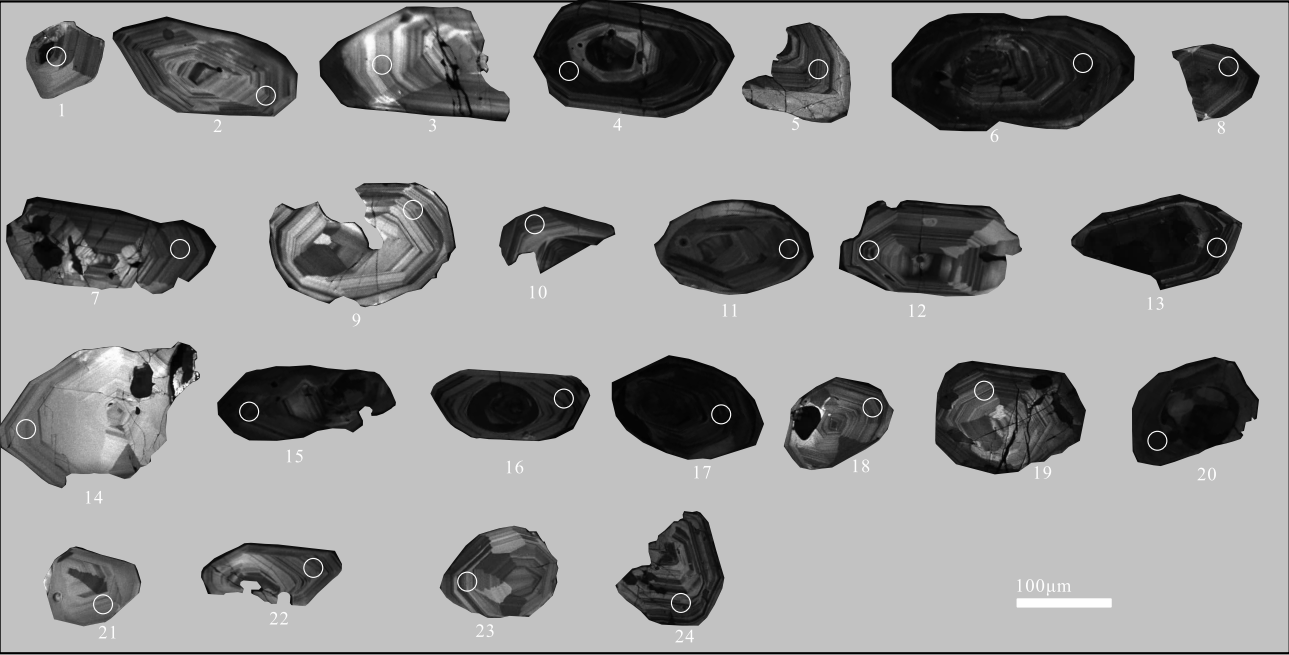


图 2 样品锆石阴极发光图像及测点编号图

Fig. 2 The CL images and the number of the zircons about the sample

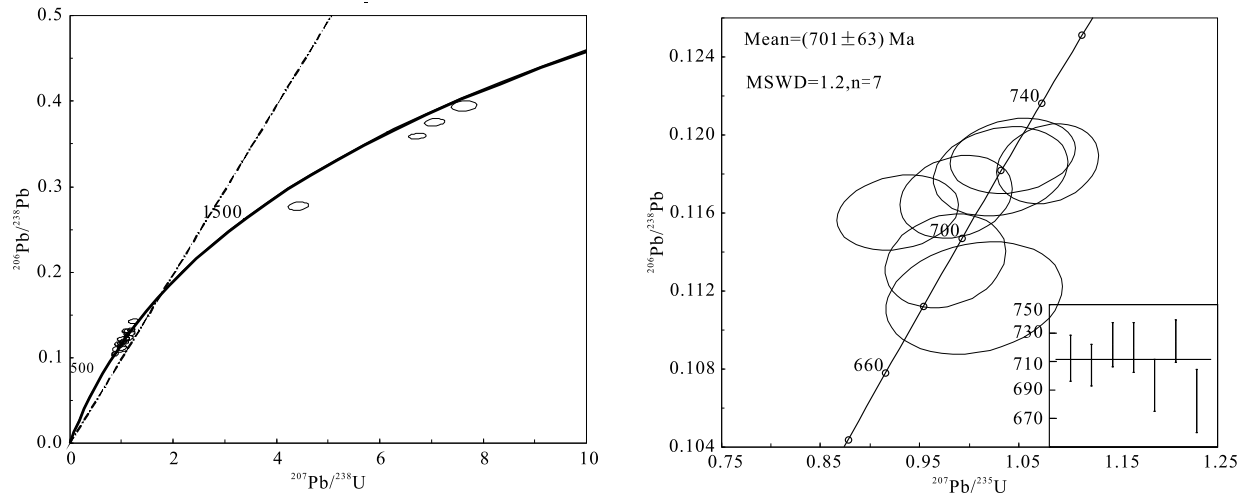


图 3 片麻状花岗闪长岩(YP01)锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 U-Pb Concordia diagram for zircons of the gneissic granodiorite

表 1 片麻状花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果表

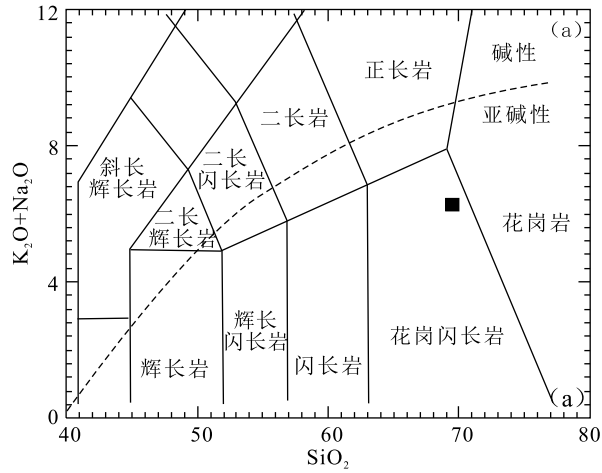
Tab. 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb analytic data for the gneissic granodiorite

测点	Th/U	同位素比值						同位素年龄						谐和度(%)				
		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ		
1	0.77	0.066 7	0.003 0	1.176 5	0.052 9	0.128 5	0.001 9	0.038 2	0.001 4	828	94	790	25	779	11	758	27	98
2	0.78	0.061 7	0.002 4	1.113 1	0.043 4	0.131 0	0.001 6	0.036 8	0.002 0	665	79	760	21	794	9	731	39	95
3	0.99	0.067 6	0.003 7	1.132 8	0.059 7	0.123 0	0.001 8	0.033 9	0.002 7	857	115	769	28	748	10	674	52	97
4	0.37	0.059 0	0.001 7	0.845 3	0.022 0	0.103 2	0.000 8	0.034 1	0.003 5	569	61	622	12	633	5	678	68	98
5	0.89	0.061 2	0.002 5	0.986 8	0.037 6	0.116 9	0.001 4	0.030 3	0.004 0	656	89	697	19	712	8	604	78	97
6	0.67	0.062 3	0.002 6	1.102 3	0.040 5	0.127 4	0.001 3	0.030 7	0.006 0	683	89	754	20	773	8	612	118	97
7	0.35	0.114 5	0.003 7	4.424 5	0.128 2	0.277 1	0.003	0.064 2	0.010 4	1 873	59	1 717	24	1 577	15	1 258	197	91
8	3.13	0.059 9	0.002 8	1.089 7	0.047 6	0.131 0	0.001 6	0.031 4	0.006 1	598	102	748	23	793	9	624	120	94
9	1.11	0.057 9	0.002 8	0.927 5	0.040 6	0.116 0	0.001 3	0.028 7	0.004 7	524	106	666	21	708	7	572	92	93
10	1.22	0.064 6	0.002 6	1.186 1	0.046 9	0.132 2	0.001 7	0.033 1	0.004 4	761	86	794	22	800	10	659	86	99
11	1.71	0.062 6	0.003 6	1.237 7	0.068 3	0.142 9	0.001 9	0.039 7	0.003 1	694	122	818	31	861	11	787	61	94
12	0.48	0.138 8	0.003 3	7.634 0	0.165 4	0.394 8	0.003 8	0.093 6	0.009 7	2 213	41	2 189	20	2 145	18	1 809	180	97
13	0.38	0.063 0	0.001 6	1.110 4	0.027 3	0.126 7	0.001 0	0.035 3	0.001 9	709	56	758	13	769	6	702	37	98
14	1.68	0.065 4	0.006 4	0.974 0	0.092 1	0.110 0	0.002 6	0.031 0	0.001 4	787	212	691	47	673	15	617	27	97
15	0.96	0.065 6	0.002 1	1.100 8	0.034 1	0.121 3	0.001 3	0.035 6	0.000 8	794	69	754	17	738	8	708	15	97
16	0.58	0.065 9	0.002 2	1.079 1	0.034 1	0.118 5	0.001 3	0.035 3	0.000 8	1 200	70	743	17	722	8	702	16	97
17	1.20	0.064 4	0.003 5	1.004 7	0.058 8	0.111 7	0.001 9	0.034 1	0.001 1	754	115	706	30	682	11	678	21	96
18	1.72	0.063 9	0.002 9	1.031 7	0.044 9	0.118 2	0.001 5	0.038 1	0.000 8	739	96	720	22	720	9	756	16	99
19	0.67	0.134 5	0.002 3	6.718 0	0.112 0	0.359 3	0.002 5	0.098 4	0.001 6	2 157	30	2 075	15	1 979	12	1 896	29	95
20	1.30	0.061 6	0.004 5	1.046 0	0.075 1	0.121 9	0.002 0	0.037 3	0.001 4	661	157	727	37	741	11	741	27	98
21	1.53	0.062 2	0.002 7	0.975 9	0.040 1	0.113 6	0.001 6	0.034 9	0.000 9	683	93	691	21	693	9	694	19	99
22	1.03	0.063 9	0.002 7	1.043 6	0.041 8	0.118 9	0.001 3	0.036 3	0.000 9	739	86	726	21	724	7	721	17	99
23	0.59	0.135 2	0.002 5	7.054 5	0.127 0	0.375 8	0.002 7	0.105 1	0.002 0	2 166	—1	2118	16	2 057	13	2 020	36	97
24	1.23	0.061 1	0.002 8	0.887 0	0.041 4	0.104 6	0.001 7	0.033 7	0.000 9	644	100	645	22	641	10	669	17	99

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素特征

样品主量元素最明显的特征为高硅、富铝、贫钾、低磷和钛,样品 SiO_2 含量为 69.48%,属酸性岩类, K_2O 含量为 2.35%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.59, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 值为 6.27%, MgO 含量为 1.32%, Al_2O_3 含量为 13.68%(表 2)。在 TAS 图解中(图 4a),样品投点落入亚碱性花岗闪长岩区域内,在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 中落入中钾钙碱性系列区域(图 4b)。铝饱和指数 A/CNK 值为 1.08, A/NK 值为 1.52,具有较高的 Al/Ga 值(2.5)。



4.2 稀土与微量元素特征

样品稀土元素含量较低, $\sum \text{REE}$ 为 253.77×10^{-6} ,轻重稀土元素分馏明显,呈现轻稀土富集,重稀土亏损。在稀土元素配分曲线图中呈富集右倾型(图 5a),具 Eu 负异常,暗示岩石经历了斜长石的分离结晶作用或源区残留有大量斜长石。

原始地幔标准化微量元素蛛网图显示(图 5b),样品富集大离子亲石元素 Th、U、Ba,与相邻元素相比,明显亏损 K、P、Ti 元素,相对亏损 Rb、Sr, Zr、Hf 具正异常。其中 P、Ti 元素的亏损可能由磷灰石的分离结晶或岩浆起源于磷灰石和钛铁矿的稳定区导致。

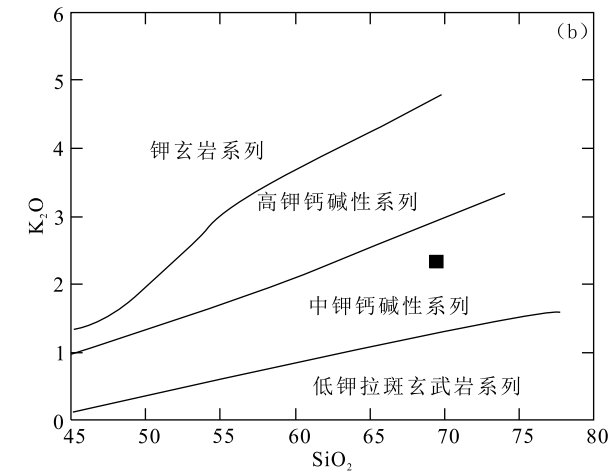


图 4 (a)片麻状花岗闪长岩 TAS 图解及(b) $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解

Fig. 4 (a)The TAS diagram(a) and(b) $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ diagram of the gneissic granodiorite

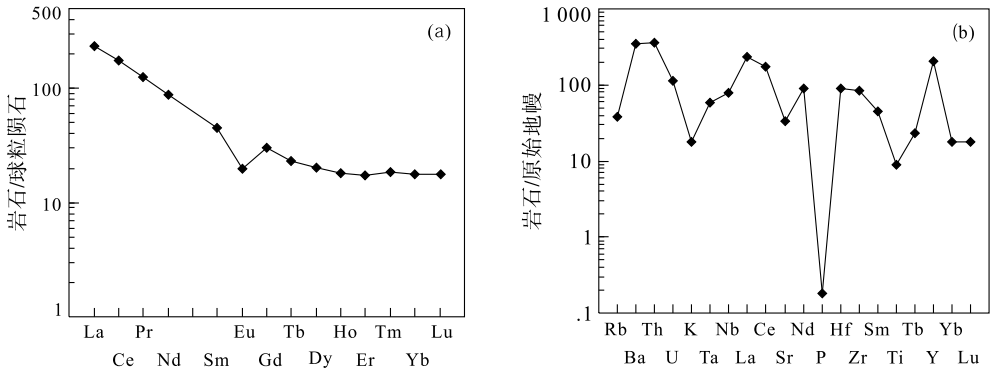


图 5 (a)稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图和(b)微量元素原始地幔标准化微量元素蛛网图
(标准化数据引自 Sun et al. ,1989)

Fig. 5 (a)Chondrite-normalized REE patterns primitive-mantle normalized(b) trace elements spider diagrams
(Normalization values after Sun et al. ,1989)

表 2 片麻状花岗闪长岩主量(%)、微量和稀土元素(10^{-6})分析数据表
Tab. 2 Major(%) and trace elements(10^{-6}) composition of the gneissic granodiorite

项目	分析值	项目	分析值	项目	分析值	项目	分析值	项目	分析值
SiO ₂	69.48	V	80.61	Ce	107.60	Pb	18.73	10 000 * Ga/Al	2.50
TiO ₂	0.67	Cr	29.97	Pr	12.00	Bi	0.03	Rb/Ba	0.11
Al ₂ O ₃	13.68	Co	10.25	Nd	41.48	Th	10.42	Rb/Sr	0.37
Fe ₂ O ₃	2.57	Ni	8.77	Sm	6.88	U	0.90	Nd/Ta	51.08
MnO	0.11	Cu	9.71	Eu	1.14	Zr	320.81	Nd/La	0.76
MgO	1.32	Zn	85.64	Gd	6.18	Ti	3 998.94	La/Ta	67.66
CaO	2.04	Ga	18.08	Tb	0.87	Al	72 375.06	Th/Ta	12.83
Na ₂ O	3.93	Rb	89.30	Hf	9.69	Na	29 122.14	Nb/Ta	23.51
K ₂ O	2.35	Sr	238.60	Dy	5.12	K	19 480.90		
P ₂ O ₅	0.10	Y	320.81	Ho	1.04	P	438.24		
LOI	0.93	Nb	19.04	Er	2.90	Mg [#]	47.71		
FeO	2.62	Mo	0.19	Tm	0.47	A/CNK	1.08		
TOTAL	99.78	Sb	0.08	Yb	2.99	A/NK	1.52		
Li	29.60	Cs	2.85	Lu	0.46	A/MF	1.96		
Be	2.46	Ba	837.27	Ta	0.81	C/MF	0.53		
Sc	10.16	La	54.94	W	0.36	AKI	0.66		

注:主量元素含量为%,微量、稀土元素含量为 10^{-6} ; $Mg^{\#} = 100 \times (Mg^{2+} / (Mg^{2+} + TFe^{2+}))$; $\delta Eu = Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{1/2}$ 。

5 讨论

5.1 岩石源区和成因

片麻状花岗岩具有较高的 SiO₂ 含量,可能为 S 型或 A 型花岗岩。镜下特征显示,岩体主要造岩矿物为钾长石、斜长石、石英、黑云母,未见代表 S 型花岗岩的石榴子石和堇青石等过铝质矿物(吴福元等, 2007)。A/CNK 值为 1.08,为弱过铝质;在原始地幔标准化微量元素蛛网图中,岩体虽具有 Sr、P、Ti 的负异常(图 6),但是明显小于典型 S 型花岗岩(Chappell et al., 1992; Champion et al., 2013)。另外,岩石中含有少量角闪石,可能指示岩浆形成过程中有变基型岩的熔融参与,具有 A 型花岗岩的矿物学特征。岩石样品的主量元素显示出高硅、富铝、贫钾、低磷和钛的特征,微量元素 Sr 亏损暗示源区内可能有斜长石矿物的残留或结晶分离相的存在;Nb 元素亏损可能是酸性残余熔体母体岩浆——玄武质岩浆自身就亏损 Nb 的缘故(李昌年,1992),同时可能暗示岩体物源部分来自于来自地壳。但样品 Nb/Ta

值为 23.51,远远大于大陆地表的比值(10~14),而接近于地幔平均值 17.5(Sun et al., 1989; Zhao et al., 2008),指示源区部分有地幔物质的参与。样品低 K₂O 含量(2.35%),这与石英角闪岩在温度 875~1 000 ℃和压力 0.8~1.5 GPa 范围内熔融形成熔体含 K₂O 区间为 2.05%~3.80%一致,同时在图 6 中落入角闪岩熔融区域。由此推断所研究岩体的源区可能以变基型岩(变角闪岩)为主。实验岩石学证明由地壳部分熔融产生的岩浆岩其 Mg[#] 一般小于 45,中酸性岩浆具有高的 Mg[#],一般认为是受到地幔物质混染的结果(Rapp et al., 1995),样品 Mg[#] 为 47.71。同样 La/Ta 值(67.66)较高,较起源于岩石圈地幔或受其混染岩浆的 La/Ta 值下限(25)明显要大,暗示岩浆可能受到了幔源物质的混染。岩石轻微的负 Sr 异常,在稀土元素配分图解上, Eu 具有轻微负异常和正异常,岩石具有较高的 Ba 含量,说明岩石形成深度可能较大。但是样品 Rb/Sr 值为 0.37,接近上地壳比值(0.32),暗示上地壳物质成分参与了岩浆演化过程。综合地球化学特征,认为研究区花岗岩岩浆主要部分熔融于角闪

岩相上地幔,同时在形成上升过程中有地壳物质的参与,发生了壳源物质与幔源物质的混合。

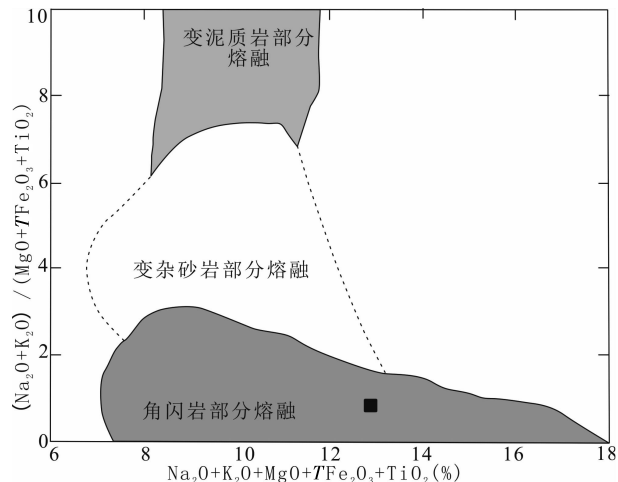


图6 样品岩石化学成分与变泥质、变杂砂岩、变角闪岩派生的实验熔体化学成分对比图

Fig. 6 Chemical contents contrast between the sample complex and meta-mudstone, greywacke, meta-amphibolite-derived experimental melt

5.2 构造背景

笔者研究片麻状花岗闪长岩侵位于古元古界化隆岩群,其结晶年龄为 (701 ± 63) Ma,该岩浆活动可以厘定化隆岩群时代的上限。研究显示,中国最大特色是发育了与哥伦比亚和罗迪尼亚超大陆汇聚与裂解有关的良好地质记录(陆松年等,2016),在扬子和塔里木陆块区则保存了与新元古代早期与罗迪尼亚超大陆汇聚有关的蛇绿岩、混杂岩、洋内弧、俯冲增生杂岩及大陆边缘弧,在约800 Ma以后则发育了与罗迪尼亚超大陆裂解有关的沉积及岩浆活动的地质记录。值得注意的是罗迪尼亚超大陆裂解是穿时的,广泛裂解出现在825 Ma左右,但裂解一直延续到600 Ma。青海南山构造带是在前寒武结晶基底上发育的岩浆岩构造带,其基底为祁连古陆块。部分学者对祁连陆块的亲属性进行了讨论,认为祁连陆块具有亲扬子特征(Wan et al., 2000, 2006; 万渝生等, 2003; 徐旺春等, 2007; 董国安等, 2007)。夏林圻等(2016)等指出祁连古陆块及与其相邻的其他古陆块(包括阿拉善陆块、塔里木克拉通、柴达木陆块和华南陆块)可能曾经是Rodinia超大陆的组成单元。并指出祁连陆块新元古代中—晚期(848~604 Ma)裂谷火山岩的存在。基于对祁连山新元古

代中—晚期至早古生代火山岩性质、时空变化特点和区域地质资料的综合分析,提出祁连山新元古代—中晚期至早古生代构造岩浆演化历史经历了5个阶段:①Rodinia超大陆裂谷化和裂解及北祁连洋和南祁连洋的开启和扩张(880~500 Ma)。②大洋俯冲和岛弧—弧后盆地发育(630~446 Ma)。③洋盆闭合、大陆深俯冲和志留纪初始磨拉石建造(445~420 Ma)。④俯冲岩片折返和造山作用(420~400 Ma)。⑤造山期后伸展和剥蚀(<400 Ma)。徐旺春等(2007)测得侵入于化隆岩群中弱片麻状花岗岩结晶年龄为 (875 ± 8) Ma;万渝生等获得化隆南部片麻状钾长花岗岩锆石U-Pb年龄为 (750 ± 0.03) Ma;何世平等(2010)在祁连造山带西段甘肃省肃北县党河一带获得北大河岩群片麻状斜长角闪岩(原岩为辉长岩)形成年龄为 (724.4 ± 3.7) Ma;雍拥等(2008)在中祁连东段湟源地区对日月亭岩体、五间房岩体、响河岩体和五峰村岩体进行研究,测得年龄在756~887 Ma;万渝生等(2003)在中祁连偏东段的马街山地区用单颗粒锆石U-Pb稀释法得到片麻状二长花岗岩和片麻状花岗闪长岩年龄为 (930 ± 7) Ma,黑云母变粒岩—片麻岩的年龄 (940 ± 3) Ma;曾建元等(2004)测得北祁连造山带雷公岩体片麻状石英闪长岩、片麻状花岗岩年龄分别为 (774 ± 23) Ma、 (776 ± 10) Ma;何世平等(2011)测得化隆岩群内条带状黑云斜长角闪岩(原岩为中性火山岩)年龄为 (884 ± 9) Ma。上述岩浆活动的年龄与Rodinia裂解事件的时间区段相符合,代表了Rodinia超大陆裂解事件在该区的响应,为Rodinia超大陆裂解的物质记录。本次获得的年龄数据与上述的岩浆活动时间相吻合。另外,从样品地球化学特征看出,岩体具有一些A型花岗岩特征,在 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{CaO} - \text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 图解中样品投点落入A型花岗岩区域内(图7a),铝碱指数AKI为0.66,接近(Whalen et al., 1987)厘定的A型花岗岩平均值($\text{AKI} = 0.95$),微量元素上同样具有A型花岗岩的特征。如较高的Zr、Nb、Y含量和较低的Sr含量。在 $\text{Rb} - (\text{Y} + \text{Nb})$ 图解中落入板内花岗岩区域(图7b)。故结合地球化学特征、年龄及前人资料,认为研究区新元古代片麻状花岗闪长岩为Rodinia超大陆裂解事件在祁连陆块中岩浆活动的响应。

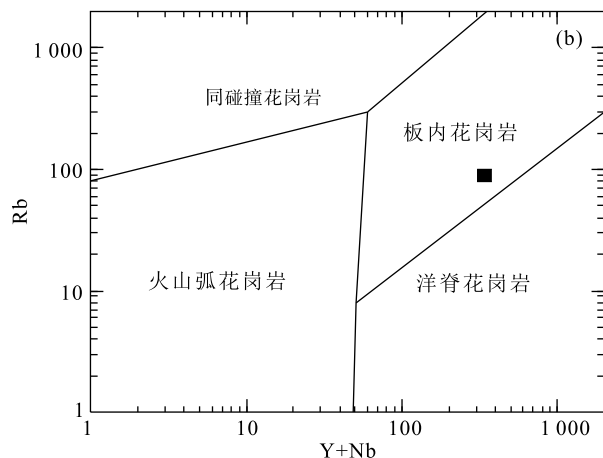
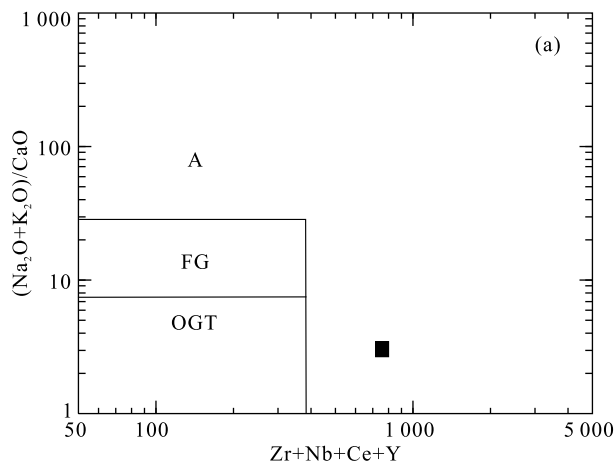


图7 (a) 样品 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{CaO}-\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ 图解和 (b) $\text{Rb}-(\text{Y}+\text{Nb})$ 图解

Fig. 7 (a) The $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{CaO}-\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ diagram and (b) $\text{Rb}-(\text{Y}+\text{Nb})$ diagram of the sample

6 结论

(1) 研究区片麻状花岗闪长岩结晶年龄为 (701 ± 63) Ma, 同时指示了化隆岩群形成年龄至少早于该岩体的形成年龄。

(2) 片麻状花岗闪长岩具有高硅、富铝、中钾等特征, 为中钾钙碱性过铝质系列, 属 A 型花岗岩。

(3) 化隆岩群片麻状花岗闪长岩形成于板内伸展环境, 是罗迪尼亚超大陆裂解事件在祁连陆块中的岩浆活动响应。

参考文献(References):

常宏, 金章东, 安芷生. 青海南山隆起的沉积证据及其对青海湖—共和盆地构造分异演化的指示[J]. 地质论评, 2009, 55(1): 49-57.

CHANG Hong, JIN Zhangdong, AN Zhisheng. Sedimentary Evidences of the Uplift of the Qinghai Nanshan (the Mountains South to Qinhai Lake) and Its Implication for structural Evolution of the Lake Qinhai-Gonghe Basin [J]. Geological Review, 2009, 55(1): 49-57.

董国安, 杨怀仁, 杨宏仪, 等. 祁连地块前寒武纪基底锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 科学通报, 2007, 52(13): 1752-1585.

DONG Guoan, YANG Huairan, YANG Hongyi, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating and its geological implications of Precambrian basement of Qilian Block [J].

Chinese Science Bulletin, 2007, 52(13): 1752-1585.

郭进京, 张国伟, 陆松年, 等. 中祁连地块东段元古宙基底地层格架讨论[J]. 中国区域地质, 1999, 18(4): 379-382.

GUO Jinjing, ZHANG Guowei, LU Songnian, et al. A discussion on the Proterozoic stratigraphy framework in the basement of eastern section of the Mid-Qilian Massif [J]. Regional Geology of China, 1999, 18(4): 379-382.

何世平, 李荣社, 王超, 等. 祁连山西段甘肃肃北地区北大河岩群片麻状斜长角闪岩的形成时代[J]. 地质通报, 2010, 29(9): 1275-1280.

HE Shiping, LI Rongshe, WANG Chao, et al. Geochronology of gneissic plagioclase-amphibolite from Beidahe Group-complex in western segment of Qilian Mountains, China [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(9): 1275-1280.

何世平, 李荣社, 王超, 等. 南祁连东段化隆岩群形成时代的进一步限定[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(1): 34-44.

HE Shiping, LI Rongshe, WANG Chao, et al. The further age constraint of Hualong Rock Group in the eastern segment of South Qilian Mountains [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2011, 30(1): 34-44.

康伟浩, 任二峰, 高亮. 青海南祁连东段化隆岩群时代重新厘定及地质意义[J]. 青海大学学报, 2016, 34(5): 52-56.

KANG Weihao, REN Erfeng, GAO Liang. The redefinition of the age of Hualong rock and geological significance in the eastern segment of the South Qilian Mountains in Qinghai [J]. Journal of Qinghai University, 2016, 34

- (5):52-56.
- 李生虎,强晓农,田涛,等. 青海南山东段花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 2018,37(7):1236-1245.
- LI Shenghu, QIANG Xiaonong, TIAN Tao, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the granites in the eastern section of Nanshan, Qinghai Province, and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37 (7):1236-1245.
- 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,1992,101-113.
- LI Changnian. Trace Elements in Igneous Petrology[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992, 101-113.
- 陆松年,李怀坤,王惠初,等. 秦-祁-昆造山带元古宙副变质岩层碎屑锆石年龄谱研究[J]. 岩石学报,2009,25(9): 2195-2208.
- LU Songnian, LI Huaikun, WANG Huichu, et al. Detrital zircon population of Proterozoic meta-sedimentary strata in the Qinling-Qilian-Kunlun Orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009,25(9):2195-2208.
- 陆松年,郝国杰,相振群. 前寒武纪重大地质事件[J]. 地学前缘,2016,23(6):140-155.
- LU Songnian, HAO Guojie, XIANG Zhenqun. Precambrian major geological events [J]. Earth Science Frontiers, 2016,23(6):140-155.
- 邱成贵,李志斌. 南祁连化隆岩群形成时代的新证据[J]. 西部资源,2016,(06):8-9.
- QIU Chenggui, LI Zhibin. The new evidence of the forming time about the Hualong Rock in South-Qilian[J]. Western Resources, 2016,(06):8-9.
- 苏建平,胡能高,张海峰,等. 北祁连西段吊大坂花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 地质科技情报, 2004,23(3):11-14.
- SU Jianping, HU Nenggao, ZHANG Haifeng, et al. Single-zircon U-Pb dating and geological significance of the Diaodaban granitic gneiss in the western segment of North Qilian Mountains [J]. Geological Science and Technology Information, 2004, 23(3):11-14.
- 田淇,石玉莲,郝亚青,等. 青海南山俯冲型侵入体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 2018,37(7):1258-1270.
- TIAN Qi, SHI Yulian, HAO Yaqing, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Nanshan subduction type intrusion in Qinghai Province and its geological significance [J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37 (7): 1258-1270.
- 徐学义,王洪亮,陈隽璐,等. 中祁连东段兴隆山群基性火山岩锆石 U-Pb 定年及岩石成因研究[J]. 岩石学报, 2008,24(4)827-840.
- XU Xueyi, WANG Hongliang, CHEN Junlu, et al. Aircon U-Pb dating and petrogenesis of Xinglongshan Group basic volcanic rocks at eastern segment of Middle Qilian Mts[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(4)827-840.
- 徐旺春,张宏飞,柳小明. 锆石 U-Pb 定年限制祁连山高级变质岩系的形成时代及其构造意义[J]. 科学通报, 2007,52(10):1174-1180.
- XU Wangchun, ZHANG Hongfei, LIU Xiaoming. U-Pb zircon dating constraints on formation time of Qilian high-grade metamorphic rock and its tectonic implications [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52 (10): 1174-1180.
- 雍拥,肖文交,袁超,等. 中祁连东段花岗岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 新疆地质,2008,26(1): 62-70.
- YONG Yong, XIAO Wenjiao, YUAN Chao, et al. LA-ICPMS zircon U-Pb ages of granitic plutons from the eastern of the Central Qilian and their geologic implication [J]. Xinjiang Geology, 2008, 26(1):62-70.
- 余吉远,李向民,马中平,等. 南祁连化隆岩群 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 西北地质, 2012,45(1):79-85.
- YU Jiyuan, LI Xianmin, MA Zhongping, et al. The LA-ICP-MS U-Pb Age and Geological Significance of Hualong Rock Group in South Qilian Mountains[J]. North-western Geology, 2012,45(1):79-85.
- 万渝生,许志琴,杨经绥,等. 祁连造山带及邻区前寒武纪深变质基底的时代和组成[J]. 地球科学,2003,24(4): 319-324.
- WAN Yusheng, XU Zhiqin, YANG Jingsui, et al. The Precambrian High-grade Basement of the Qilian Terrane and Neighboring Areas: Its Ages and Compositions[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2003, 24(4):319-324.
- 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 Fuyuan, LI Xianhua, YANG Jinhui, et al. Discussions

- on the Petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 36(6): 1217-1238.
- 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于构造岩化[J]. *中国地质*, 2016, 43(04): 1087-1138.
- XIA Linqi, LI Xiangmin, YU Jiyuan, et al. Mid-Late Neoproterozoic to Early Paleozoic volcanism and tectonic evolution of the Qilian Mountain[J]. *Chinese Geology*, 2016, (4): 1087-1138.
- 张国伟, 郭安林, 姚安平. 中国大陆构造中的西秦岭—松潘大陆构造结[J]. *地质前缘*, 2004, (3): 23-32.
- ZHANG Guowei, GUO Anlin, YAO Anping. Western Qinling-Songpan continental tectonic node in China's continental tectonics[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, (3): 23-32.
- 曾建元, 杨宏仪, 万渝生, 等. 北祁连山变质杂岩中新元古代(~775Ma)岩浆活动记录的发现: 来自 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *科学通报*, 2006, 51(5): 575-581.
- ZENG Jianyuan, YANG Hongyi, WAN Yusheng, et al. The discovery of neoproterozoic magmatic activity records of the metamorphic complex in North-Qilian and their geological implication: from SHRIMP zircon U-Pb Age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(5): 575-581.
- 张永明, 裴先治, 李佐臣, 等. 青海南山当家寺花岗岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J]. *地质学报*, 2017, 91(3): 523-541.
- ZHANG Yongming, PEI Xianzhi, LI Zuochen, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating and Geochemistry of the Dangjiasi Granitic Complex in the Qinghai Nanshan Tectonic Zone, and Its Geological Implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(3): 523-541.
- 张永明, 裴先治, 李佐臣, 等. 青海南山沟后岩浆杂岩体锆石 U-Pb 年代学、岩石成因及其地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2017, 41(5): 908-932.
- ZHANG Yongming, PEI Xianzhi, LI Zuochen, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating, Petrogenesis of the Gouhou Complex in the Qinghai Nanshan Tectonic Zone, and its Geological Implications[J]. *Geotectonica et Metalogenia*, 2017, 41(5): 908-932.
- 张永明, 裴先治, 李佐臣, 等. 青海南山构造带西段黑马河花岗杂岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *地质论评*, 2017, 63(4): 1079-1101.
- ZHANG Yongming, PEI Xianzhi, LI Zuochen, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating, Geochemistry and Its Geological Significance of the Heimahe Granitic Plutou in the Western Segment of the Qinghai' nanshan Tectonic Belt [J]. *Geological Review*, 2017, 63(4): 1079-1101.
- Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, et al. Igenous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contributions to Mineralogy&Petrology*, 2002, 143(5): 602-622.
- Chappell B W, White A J R. I. S-type granites in the Lachlan Fold Belt [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 1992, 3(1-2): 1-26.
- Champion D C, Bultitude R J. The geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of Paleozoic fractionated S-types granites of North Queensland: Implications for S-type granite petrogenesis[J]. *Lithos*, 2013, 162-163: 37-56.
- Abdullah Kaygusuz, Wolfgang Siebel, Cuneyt Sen, et al. Petrochemistry and petrology of I-type granitoids in an arc setting: the composite Torul pluton, Eastern Pontides, NE Turkey [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2008, 97(4): 739-764.
- Rapp R P, Waston E B. Dehydration melting of meta basalt at 8~32 kbar implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36(4): 891-931.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and proccession. In: Sunders A D, Norry M J, eds. *Magmatism in the Ocean Basins*[J]. London: Geo. Soc. Spec. Publ, 1989, 42: 313-345.
- Wan Y S, Yang J S, Xu Z Q, et al. Geochemical characteristics of the Maxianshan complex and Xinglongshan group in the eastern segment of the Qilian orogenic belt[J]. *J Geol Soc China*, 2000, 43(1): 52-68.
- Wan Y S, Zhang J C, Yang J S, et al. Geochemistry of high-grade metamorphic rocks of the North Qaidam Mountains and their geological significance[J]. *J Asian Earth Sci*, 2006, 28: 174-184.
- Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Wang Qiang, et al. Some aspects on geochemistry of Nb and Ta [J]. *Geochimica*, 2008, 37(4): 304-320.