

马建军,王珩,何川,等.南祁连造山带新元古代后碰撞岩浆作用:年代学和地球化学证据[J].地球科学与环境学报,2018,40(2):133-154.  
MA Jian-jun, WANG Heng, HE Chuan, et al. Neoproterozoic Post-collision Magmatism in South Qilian Orogen, China: Evidenced by Geochronology and Geochemistry[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(2): 133-154.

## 南祁连造山带新元古代后碰撞岩浆作用: 年代学和地球化学证据

马建军<sup>1</sup>, 王珩<sup>1</sup>, 何川<sup>1</sup>, 王璐<sup>1</sup>, 王勤燕<sup>2</sup>, 陈能松<sup>1\*</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 浙江大学地球科学学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**南祁连造山带南缘乌北地体中的柯柯沙花岗岩岩浆作用记录了中国西北部响应全球 Rodinia 超大陆汇聚过程中长时间的后碰撞花岗岩岩浆作用历史。柯柯沙花岗岩闪长岩和二长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年获得其锆石结晶年龄分别为  $(861 \pm 9) \sim (863 \pm 4)$  Ma 和  $(827 \pm 6) \sim (830 \pm 8)$  Ma, 变质锆石年龄为  $(463 \pm 3)$  Ma。结合先期获得的年龄数据,柯柯沙花岗岩体可能为约 860 Ma 和 810~830 Ma 的两阶段岩浆作用产物。花岗闪长岩和二长花岗岩分别呈弱过铝质和弱-强过铝质的高钾钙碱性 S 型花岗岩特征,其岩浆形成于后碰撞阶段的伸展构造环境,源区岩石主要为变质杂砂岩,岩浆部分熔融温度约为 800 °C,压力在 0.9~1.4 GPa 之间。综上所述,乌北地体主碰撞阶段结束于 860 Ma 之前。

**关键词:**花岗岩;锆石 U-Pb 年龄;后碰撞岩浆作用;Rodinia 超大陆;乌北地体;南祁连造山带

**中图分类号:** P597<sup>+</sup>.3; P588.12<sup>+</sup>1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2018)02-0133-22

## Neoproterozoic Post-collision Magmatism in South Qilian Orogen, China: Evidenced by Geochronology and Geochemistry

MA Jian-jun<sup>1</sup>, WANG Heng<sup>1</sup>, HE Chuan<sup>1</sup>, WANG Lu<sup>1</sup>, WANG Qin-yan<sup>2</sup>, CHEN Neng-song<sup>1\*</sup>

(1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China)

**Abstract:** The protracted post-collisional magmatism in response to assembly of the global Rodinia supercontinent in Northwest China is recorded by the magmatism of Kekesha granite pluton in North Wulan terrane of South Qilian Orogen, China. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yields crystallization ages of  $(861 \pm 9) \sim (863 \pm 4)$  Ma and  $(827 \pm 6) \sim (830 \pm 8)$  Ma for Kekesha granodiorites and monzogranites, respectively, with a metamorphic age of  $(463 \pm 3)$  Ma. Combined with the previous ages, Kekesha granite pluton may be produced by two stages of magmatism around 860 Ma and 810-830 Ma. The granodiorites and monzogranites are characterized respectively by weakly peraluminous and weakly-strongly peraluminous but totally high potassium calc-alkaline S-type granites, and the precursor magma is formed in the extensional tectonic environment of the post-collision stage, and the source rocks are dominantly meta-graywackes with magmatic partial melting temperature of 800 °C and pressures of 0.9-1.4 GPa. In

收稿日期:2018-01-08;修回日期:2018-03-14

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家自然科学基金项目(41372075)

作者简介:马建军(1991-),男,回族,新疆伊宁人,理学硕士研究生, E-mail: 1620001680@qq.com。

\* 通讯作者:陈能松(1956-),男,广西南宁人,教授,博士研究生导师,理学博士, E-mail: chennengsong@163.com。

conclusion, the main collision phase of North Wulan terrane ends before 860 Ma.

**Key words:** granite; zircon U-Pb age; post-collisional magmatism; Rodinia supercontinent; North Wulan terrane; South Qilian Orogen

## 0 引言

自从 Rodinia 超大陆的概念提出以来, Rodinia 超大陆的形成与演化一直是国内外学者关注的焦点。年代学、古地磁学和古地层学等研究表明, Rodinia 超大陆是全球分散的陆块以劳伦大陆为核心经 800~1 300 Ma 之间的长期俯冲和碰撞而形成的<sup>[1-4]</sup>。中国古陆块曾不同程度地参与 Rodinia 超大陆的聚散演化,在塔里木地块和扬子地块及其周缘造山带留下大量反映 Rodinia 超大陆新元古代汇聚的记录<sup>[5-10]</sup>。造山带中的 Rodinia 超大陆汇聚信息保留在一些卷入造山带的构造地块或变质体中。祁连造山带是中国中部巨型复合造山带(中央造山带)西段的重要组成部分<sup>[11]</sup>。前人研究发现其内发育大量新元古代岩浆-变质事件,认为是响应全球 Rodinia 超大陆汇聚事件的物质记录。中祁连地块东段侵入到湟源群中近 SN 向展布的花岗岩带具有 S 型同碰撞花岗岩性质,单颗粒锆石 U-Pb 年龄为  $(917 \pm 12)$  Ma<sup>[12]</sup>;北山一带记录有陆-陆碰撞地壳增厚阶段形成的花岗岩岩浆作用  $((880 \pm 31)$  Ma)<sup>[13]</sup> 和近于同期的榴辉岩相高压变质作用  $((857 \pm 71)$  Ma)<sup>[14]</sup>;后续研究又相继在托勒、湟源、化隆、马街山等地识别出了大量约 900 Ma(875~943 Ma)的弧岩浆性质花岗岩<sup>[15-19]</sup>;近年来,王珩在南祁连造山带南缘的乌北地体中鉴别出指示 Rodinia 超大陆于 1.0~1.1 Ga 汇聚的多期花岗岩侵入体<sup>[20]</sup>;马建军等对该地体东北部的柯柯沙花岗岩体开展年代学研究,获得 810~830 Ma 花岗岩岩浆侵入作用的年代学证据(未发表),但对该岩体的组成、岩石成因和形成环境仍缺乏系统研究和探讨。本文基于野外地质观察、岩相学、年代学和地球化学的综合研究,进一步划分柯柯沙花岗岩体的侵位阶段,探讨其岩石成因,分析岩浆产生的源区性质和构造环境,为深化 Rodinia 超大陆在中国西北部的演化过程研究提供新资料。

## 1 区域地质背景

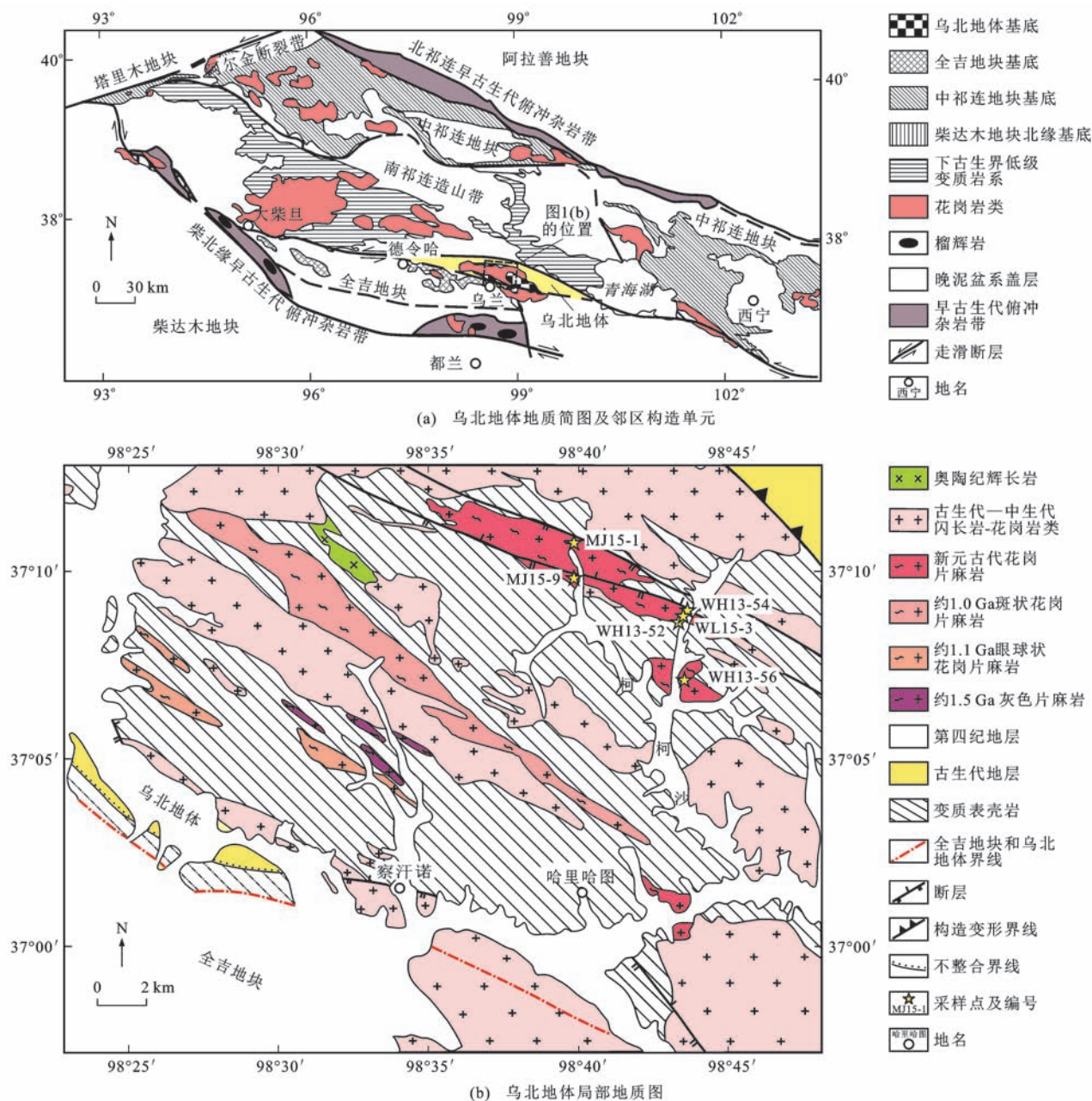
乌北地体位于青海省乌兰县北部,构造上位于南祁连造山带南缘[图 1(a)]。该地体呈透镜状,南与具有克拉通残片性质的全吉地块呈断裂接触,面积约 2 000 km<sup>2</sup>,主要由中-高级变质表壳岩和岩浆

侵入岩组成[图 1(b)]。青海省地质矿产局将该变质表壳岩归于达肯大坂岩群,时代划属于古元古代<sup>[21]</sup>;然而近期的碎屑锆石和花岗岩锆石年龄将之约束在 1.50~1.67 Ga 的中元古代(未发表);另外,李秀财等在乌北地体东北部的达肯大坂岩群中识别出一套混合岩化黑云斜长片麻岩,SHRIMP 锆石年龄为 494~504 Ma,认为该地体的达肯大坂岩群可能为一套前寒武纪变质基底岩系和早古生代变质火山岩系的变质表壳岩组合<sup>[22-23]</sup>。岩浆侵入岩由中-新元古代、古生代和中生代等不同时代的岩体构成。中-新元古代侵入岩为约 1.5 Ga 的变质钠质花岗岩(灰色片麻岩)<sup>[24]</sup>、约 1.1 Ga 眼球状角闪花岗闪长岩和眼球状黑云母花岗闪长岩以及约 1.0 Ga 斑状二长花岗岩<sup>[20]</sup>;前寒武纪岩浆岩和部分早古生代辉长岩、花岗岩受早古生代晚期强烈的区域变质变形作用改造;晚古生代侵入岩包含辉长岩、闪长岩-石英闪长岩、英云闪长岩等;中生代侵入岩有二长花岗岩和正长花岗岩。

## 2 岩体地质及岩相学特征

尽管柯柯沙花岗岩体经历强烈变质变形作用,但其宏观产状仍可清晰判别岩体的边界和分布,因此,本文仍用岩浆侵入岩的岩性。柯柯沙花岗岩体出露于乌北地体的东北部,由北、南两个岩体组成。北岩体呈 NWW—SEE 走向的不规则长透镜体展布,面积约 20 km<sup>2</sup>;南岩体呈小型岩枝分布在北岩体的东南侧,面积约 3 km<sup>2</sup>[图 1(b)]。北岩体的北侧与中元古代达肯大坂岩群呈断层接触,南侧侵入于达肯大坂岩群中。岩体局部发育黑云变粒岩、黑云斜长片麻岩和石英岩等岩石包体或变质基性岩脉(岩性为斜长角闪岩),偶见变质变形后侵入的块状辉绿岩脉和花岗岩脉(图 2)。

柯柯沙花岗岩体岩性主要为花岗闪长岩和二长花岗岩。花岗闪长岩露头呈灰色—灰白色,具中粒变余花岗结构和片麻状构造[图 3(a)]。岩石组成矿物主要有斜长石(体积分数为 40%~45%)、钾长石(15%~20%)、石英(18%~24%)、黑云母(8%~12%)[图 3(b)],次要矿物有石榴石(3%~6%),副矿物有锆石、磷灰石、榍石和不透明矿物等,部分样品中可见少量角闪石或其假象(已全部转变为黑云



图(a)引自文献[25],有所修改;图(b)引自文献[24],有所修改

图1 南祁连造山带乌北地体及邻区构造单元地质简图

Fig. 1 Geological Sketch Maps of North Wulan Terrane in South Qilian Orogen and Its Adjacent Tectonic Units

母,体积分数为1%~2%)零星分布[图3(c)]。二长花岗岩露头呈灰白色—灰红色,具中—细粒变余花岗结构和片麻状构造[图3(d)],由钾长石(体积分数为25%~30%)、斜长石(30%~35%)、石英(25%~30%)、黑云母(6%~10%)和少量石榴石(2%~3%)等矿物组成,副矿物包括锆石、磷灰石、榍石和不透明矿物。长石类矿物多呈他形,局部见变余的自形一半自形板状晶体,后者表明其为岩浆成因;黑云母呈红褐色片状,定向断续分布[图3(e)];石榴石多呈半自形,晶体内部干净无任

何矿物包裹体,指示可能为岩浆成因,裂纹发育,部分黑云母沿其裂隙生长并发生绿泥石化,局部发育港湾状边缘,可能指示剪切溶解[图3(f)]。

### 3 样品采集和分析方法

采集用于锆石 U-Pb 定年的花岗岩全岩样品约2 kg,采集用于全岩主、微量元素分析的新鲜样品约0.5 kg。用常规方法按流程将锆石精样分离出来,然后在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒,用无色透明的环氧树脂制作成样品靶,在样品靶





图 2 柯柯沙花岗岩体野外地质特征

Fig. 2 Field Geological Characteristics of Kekesha Granite Pluton

固结后打磨和抛光至锆石中心暴露。锆石阴极发光 (CL) 图像在武汉上谱分析科技有限责任公司采用高真空扫描电子显微镜 (JSM-IT100) 拍摄。样品 WH13-52 和 WH13-56 的锆石 U-Pb 定年在香港大学地球科学系化学地球动力学联合实验室完成, 采用装载 Resonetics RESolution M-50-HR 系统的 Nu MC-ICP-MS 仪进行测试, 激光剥蚀束斑直径为  $30\ \mu\text{m}$ , 单点剥蚀时间为  $40\ \text{s}$ , 剥蚀深度为  $30\sim 40\ \mu\text{m}$ , 频率为  $6\ \text{Hz}$ , 信号强度为  $0.03\ \text{V}$ 。样品 WL15-3 和 WH13-54 的锆石 U-Pb 定年和微量元素分析由武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICP-MS 仪同时分析完成。GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成, ICP-MS 仪型号为 Agilent 7700e。激光剥蚀束斑直径和频率分别为  $32\ \mu\text{m}$  和  $6\ \text{Hz}$ 。U-Pb 同位素组成和微量元素含量分别采用国际标准锆石 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作外标, 进行相应的分馏校正。原始数据处理采用软件 ICPMSDataCal<sup>[26-27]</sup> 完成, 锆石 U-Pb 年龄谱和曲线绘制和年龄加权平均计算采用程序 Isoplot 3.00 完成。

锆石 Lu-Hf 同位素分析在中国地质大学 (武

汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室采用 Neptune Plus MC-ICP-MS 仪进行测定, 其进样采集系统为 193nm Geolas 2005 激光准分子 ArF 系统, 测试过程采用单点剥蚀模式, 单点剥蚀时间为  $50\ \text{s}$ , 激光剥蚀束斑直径为  $44\ \mu\text{m}$ , 频率为  $6\ \text{Hz}$ , 以国际标准锆石 91500、GJ-1、TEM 作为标样。详细的分析流程和方法见文献[28]。

全岩主、微量元素分析在中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。主量元素采用日本岛津公司生产的 XRF-1800 型连续 X 射线荧光光谱仪对熔融玻璃片进行分析, 测试结果精度优于  $4\%$ , 准确性高于  $3\%$ , 具体测试方法和分析流程见文献[29]。微量元素经消解处理后采用等离子体质谱仪 Aglient 7500a ICP-MS 分析完成, 稀土元素分析精度优于  $5\%$ , 其他微量元素分析精度优于  $5\%\sim 12\%$  不等。测试过程中采用内标和外标综合控制测试质量, 详细分析方法及流程见文献[26]。

## 4 结果分析

### 4.1 锆石 U-Pb 年代学特征

两件花岗闪长岩 (样品 WL15-3 和 WH13-52)



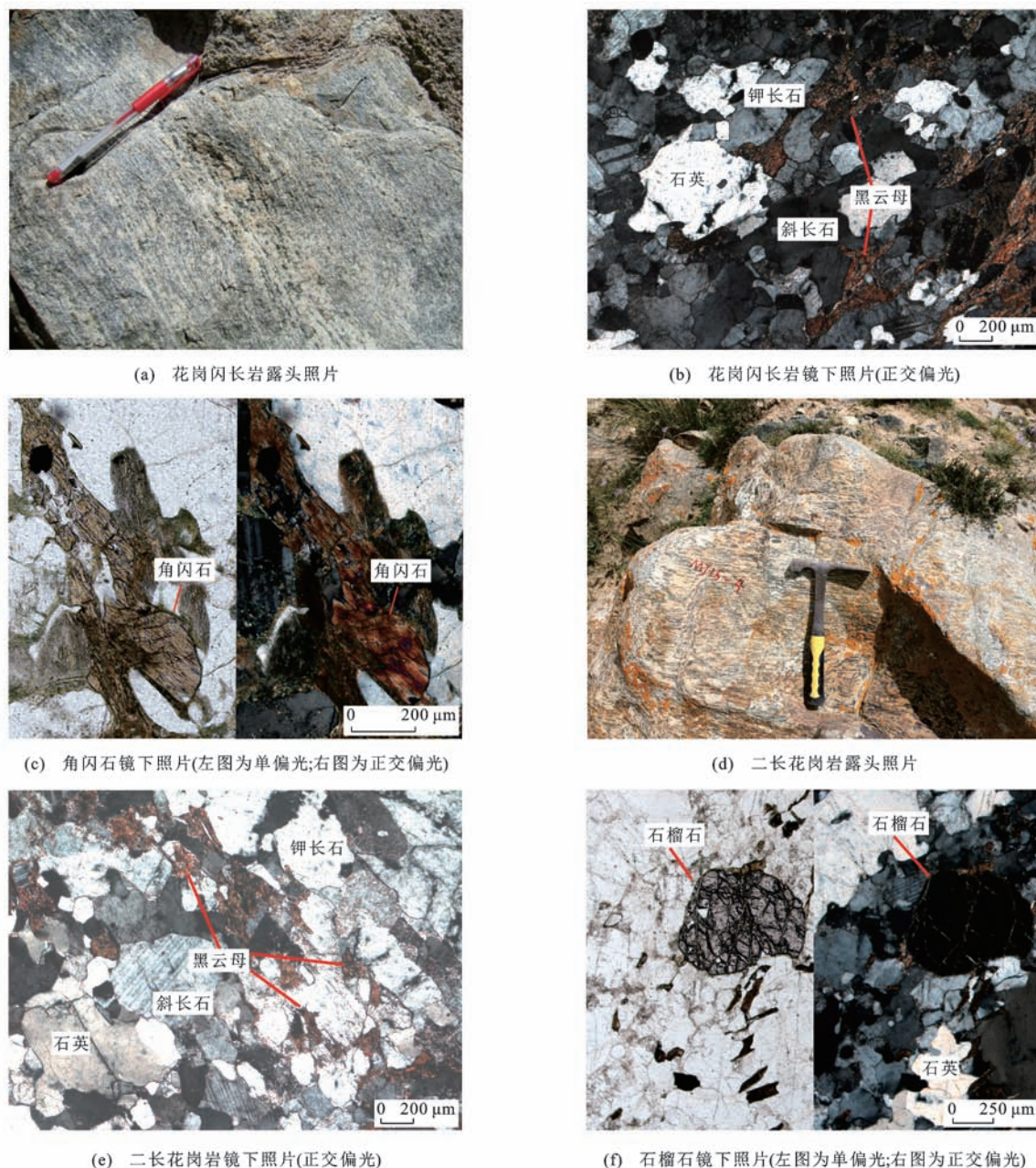


图3 花岗闪长岩和二长花岗岩露头 and 镜下照片

Fig. 3 Outcrop and Microscopic Photos of Granodiorites and Monzogranites

和两件二长花岗岩(样品 WH13-54 和 WH13-56)的锆石 U-Pb 年龄分析结果见表 1。

#### 4.1.1 花岗闪长岩

样品 WL15-3(37°8′44.95″N, 98°43′28.98″E)中的锆石多为半自形—自形柱状晶体,长宽比为 1~3。阴极发光图像显示锆石具典型的核-边结构:核部阴极发光强度较弱,可能与 Th、U 含量(质量分数,下同)较高有关<sup>[30-31]</sup>,振荡环带明显,显示岩浆成因特征<sup>[32]</sup>;边部为较窄的亮灰色边,部分呈残缺不全的镶边,无环带,可能为变质增生或重结晶边[图 4(a)]。核部振荡环带保存相对较好部位的 21 个分

析点  $w(\text{Th})/w(\text{U})$  值为 0.13~0.63(表 1),进一步指示岩浆成因特征<sup>[33-34]</sup>。在 U-Pb 年龄谐和曲线上,8 个分析点集中在近上交点的谐和曲线附近,另外 13 个分析点明显位于谐和曲线下方。这 21 个分析点给出的不一致线上交点年龄为  $(853 \pm 13) \text{ Ma}$  (平均标准权重偏差(MSWD)为 0.36) [图 5(a)],其中谐和曲线附近 8 个分析点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为  $(861 \pm 9) \text{ Ma}$  (MSWD 值为 0.42) [图 5(b)],与上交点年龄在误差范围内一致。因此,  $(861 \pm 9) \text{ Ma}$  被视为花岗闪长岩岩浆结晶年龄。

样品 WH13-52(37°8′28.86″N, 98°43′21.27″E)中

表 1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析结果

Tab. 1 Analysis Results of LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages

分析点	$w(\text{Pb})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{U})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/w(\text{U})$	$N(^{207}\text{Pb})/$ $N(^{206}\text{Pb})$	$n(^{207}\text{Pb})/$ $n(^{235}\text{U})$	$n(^{206}\text{Pb})/$ $n(^{238}\text{U})$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$ 年龄/Ma	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$ 年龄/Ma	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	谐和度/ %
WL15-3-1	134	98	708	0.14	0.063 0±0.002 6	1.293 3±0.05	0.144 9±0.002 2	709±87	843±23	872±12	103
WL15-3-2	61	78	124	0.63	0.066 1±0.005 3	1.304 7±0.10	0.142 3±0.003 0	811±167	848±43	858±17	101
WL15-3-3	231	207	753	0.27	0.066 4±0.002 2	1.340 2±0.04	0.143 3±0.001 9	820±69	863±18	863±11	100
WL15-3-4	134	91	240	0.38	0.066 5±0.002 6	1.353 7±0.05	0.146 5±0.003 1	820±79	869±22	881±18	101
WL15-3-5	99	83	413	0.20	0.066 5±0.002 5	1.329 1±0.05	0.142 1±0.001 8	822±80	858±22	857±10	100
WL15-3-6	194	176	798	0.22	0.066 7±0.002 5	1.331 5±0.05	0.142 2±0.002 0	828±78	860±20	857±11	100
WL15-3-7	78	76	433	0.18	0.069 4±0.003 1	1.127 1±0.05	0.114 7±0.001 6	922±97	766±24	700±9	91
WL15-3-8	113	94	723	0.13	0.067 5±0.002 4	1.182 8±0.04	0.124 3±0.001 7	852±74	793±19	755±10	95
WL15-3-9	156	150	727	0.21	0.066 5±0.002 0	1.278 8±0.04	0.135 7±0.001 5	833±63	836±16	820±9	98
WL15-3-10	159	156	842	0.18	0.066 9±0.002 0	1.227 0±0.04	0.128 6±0.001 5	835±62	813±16	780±8	96
WL15-3-11	125	116	349	0.33	0.082 2±0.007 0	0.852 7±0.06	0.076 5±0.001 7	1 250±168	626±36	475±10	76
WL15-3-12	87	128	263	0.48	0.067 3±0.003 3	1.219 0±0.06	0.127 6±0.002 5	856±102	809±26	774±14	96
WL15-3-13	131	183	304	0.60	0.067 7±0.003 5	1.255 1±0.06	0.131 5±0.002 5	857±109	826±27	797±14	96
WL15-3-14	193	207	652	0.32	0.066 5±0.003 2	1.349 6±0.07	0.141 4±0.002 4	822±102	867±30	852±13	98
WL15-3-15	128	127	705	0.18	0.067 4±0.002 7	1.185 2±0.04	0.123 8±0.001 8	850±83	794±21	753±10	95
WL15-3-16	56	101	193	0.52	0.071 1±0.004 1	1.087 8±0.06	0.109 4±0.002 8	961±117	747±27	669±16	90
WL15-3-17	146	200	591	0.34	0.073 2±0.003 5	0.982 1±0.05	0.093 3±0.001 7	1 020±98	695±25	575±10	83
WL15-3-18	104	103	385	0.27	0.067 3±0.003 2	1.210 4±0.06	0.127 4±0.002 4	850±100	805±26	773±14	96
WL15-3-19	72	76	498	0.15	0.074 2±0.004 4	0.945 3±0.05	0.091 4±0.001 7	1 056±119	676±26	564±10	83
WL15-3-20	121	96	646	0.15	0.066 4±0.002 8	1.326 4±0.05	0.142 5±0.002 1	817±89	857±23	859±12	100
WL15-3-21	97	110	580	0.19	0.069 1±0.003 3	1.152 4±0.05	0.119 1±0.002 0	902±99	778±25	726±11	93
WH13-52-1				0.23	0.066 9±0.000 2	1.347 6±0.01	0.146 0±0.001 3	835±4	867±3	878±4	101
WH13-52-2				0.85	0.069 1±0.000 2	1.329 6±0.01	0.139 4±0.000 6	902±6	859±3	841±4	98
WH13-52-3				0.26	0.069 3±0.000 1	1.323 1±0.01	0.138 4±0.000 9	909±2	856±4	836±5	98
WH13-52-4				0.35	0.072 5±0.000 3	1.252 3±0.01	0.124 8±0.000 8	1 000±9	824±6	758±5	92
WH13-52-5				0.66	0.068 8±0.000 2	1.316 3±0.01	0.138 6±0.000 8	892±6	853±4	837±4	98
WH13-52-6				0.26	0.069 2±0.000 1	1.336 0±0.01	0.140 0±0.001 3	906±4	862±5	845±8	98
WH13-52-7				0.21	0.069 5±0.000 2	1.311 4±0.01	0.137 0±0.001 6	915±6	851±6	828±9	97
WH13-52-8				0.34	0.069 1±0.000 1	1.314 0±0.02	0.137 8±0.001 9	902±3	852±8	832±11	98
WH13-52-9				0.55	0.067 4±0.000 4	1.339 1±0.01	0.143 9±0.000 6	852±13	863±5	867±4	100
WH13-52-10				0.52	0.069 1±0.000 2	1.301 7±0.01	0.136 5±0.001 3	903±6	846±6	825±7	97
WH13-52-11				0.16	0.067 1±0.000 1	1.342 2±0.01	0.145 1±0.001 0	840±2	864±4	873±5	101
WH13-52-12				0.22	0.069 8±0.000 1	1.301 5±0.01	0.135 3±0.001 1	924±5	846±4	818±6	97
WH13-52-13				0.27	0.070 5±0.000 2	1.286 7±0.01	0.132 4±0.001 2	943±6	840±4	802±7	95
WH13-52-14				0.84	0.067 9±0.000 1	1.336 7±0.01	0.142 6±0.001 1	878±5	862±5	859±6	100
WH13-54-1	66	48	607	0.08	0.055 1±0.001 9	0.565 5±0.02	0.074 0±0.000 8	417±75	455±13	460±5	101
WH13-54-2	171	71	621	0.11	0.056 2±0.001 3	0.591 2±0.01	0.075 7±0.000 7	461±50	472±9	471±4	100
WH13-54-3	94	63	604	0.10	0.058 2±0.001 4	0.609 3±0.02	0.075 2±0.001 1	539±52	483±11	468±7	97
WH13-54-4	85	75	866	0.09	0.055 1±0.001 4	0.566 1±0.01	0.074 2±0.000 6	413±56	455±9	462±4	101

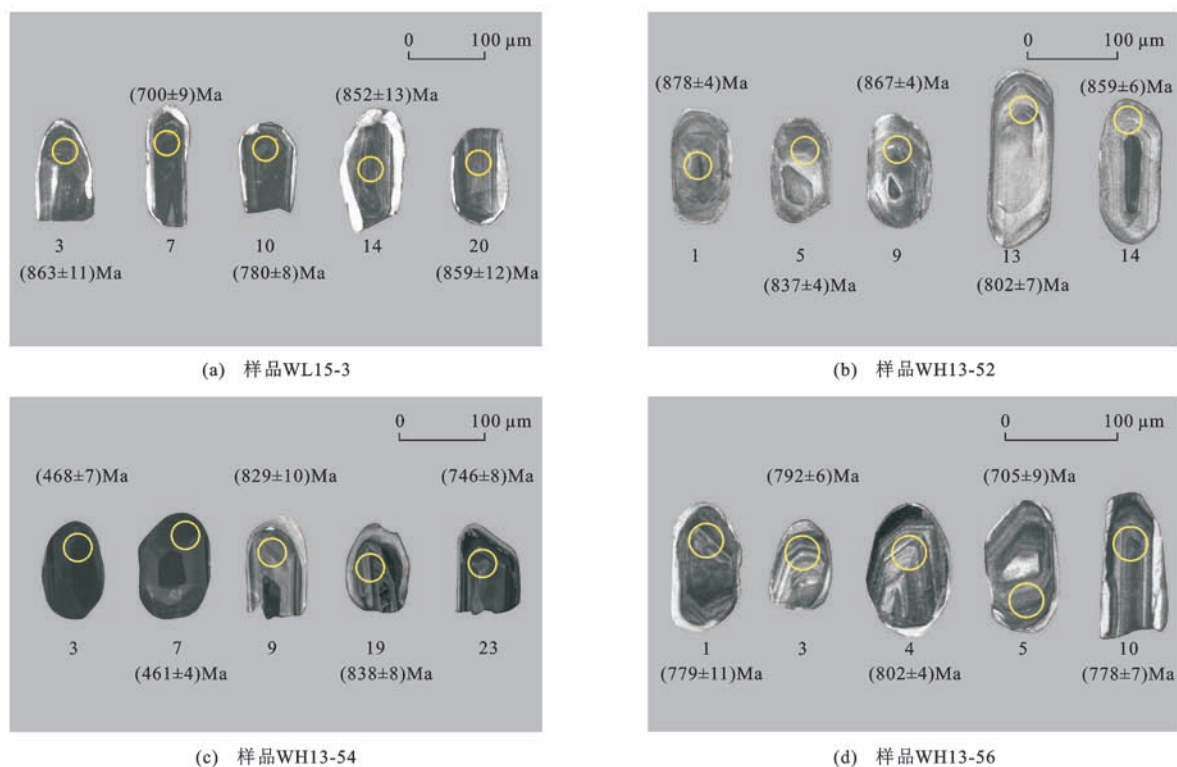
续表 1

分析点	$w(\text{Pb})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{U})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/w(\text{U})$	$N(^{207}\text{Pb})/$ $N(^{206}\text{Pb})$	$n(^{207}\text{Pb})/$ $n(^{235}\text{U})$	$n(^{206}\text{Pb})/$ $n(^{238}\text{U})$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$ 年龄/Ma	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$ 年龄/Ma	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	谐和度/ %
WH13-54-5	87	76	420	0.18	0.068 0±0.001 9	1.163 9±0.03	0.122 9±0.001 9	878±56	784±18	747±11	95
WH13-54-6	100	84	855	0.10	0.057 6±0.001 9	0.592 5±0.02	0.074 2±0.000 7	522±70	472±12	461±4	98
WH13-54-7	206	45	501	0.09	0.056 9±0.001 7	0.584 2±0.02	0.074 1±0.000 7	500±67	467±11	461±4	99
WH13-54-8	159	182	349	0.52	0.066 7±0.001 7	1.282 7±0.02	0.138 7±0.001 5	828±52	838±15	837±8	100
WH13-54-9	116	128	342	0.37	0.065 5±0.001 5	1.248 4±0.02	0.137 2±0.001 7	791±50	823±15	829±10	101
WH13-54-10	294	341	599	0.57	0.067 2±0.001 7	1.297 4±0.02	0.139 4±0.001 2	856±51	845±13	841±7	100
WH13-54-11	252	277	563	0.49	0.068 0±0.001 8	1.212 6±0.02	0.128 7±0.001 3	878±54	806±15	780±8	97
WH13-54-12	139	109	665	0.16	0.066 9±0.001 6	1.263 7±0.02	0.136 4±0.001 2	835±49	830±13	824±7	99
WH13-54-13	134	143	487	0.29	0.067 6±0.001 4	1.224 0±0.02	0.130 9±0.001 0	855±44	812±12	793±5	98
WH13-54-14	61	24	318	0.08	0.053 8±0.001 6	0.552 4±0.02	0.074 3±0.000 7	361±67	447±10	462±4	103
WH13-54-15	132	144	349	0.41	0.067 1±0.001 3	1.251 8±0.02	0.134 9±0.001 1	839±41	824±11	816±7	99
WH13-54-16	297	281	1 027	0.27	0.067 0±0.001 4	1.275 7±0.02	0.137 7±0.001 4	839±43	835±12	832±8	100
WH13-54-17	121	114	437	0.26	0.065 6±0.001 8	1.282 6±0.02	0.137 8±0.001 6	794±53	838±12	832±9	99
WH13-54-18	147	173	379	0.46	0.067 3±0.001 6	1.183 9±0.02	0.127 2±0.001 3	848±49	793±13	772±7	97
WH13-54-19	102	82	582	0.14	0.067 1±0.001 3	1.288 4±0.02	0.138 8±0.001 5	839±42	841±13	838±8	100
WH13-54-20	70	27	416	0.06	0.058 9±0.001 4	0.605 9±0.01	0.074 7±0.000 8	561±45	481±9	464±5	97
WH13-54-21	211	26	1 029	0.03	0.058 5±0.001 1	0.603 9±0.01	0.074 7±0.000 6	550±43	480±7	464±3	97
WH13-54-22	69	42	474	0.09	0.056 0±0.001 4	0.571 6±0.01	0.073 8±0.000 6	454±57	459±9	459±4	100
WH13-54-23	94	89	458	0.19	0.068 9±0.001 6	1.169 7±0.02	0.122 6±0.001 4	894±44	786±14	746±8	95
WH13-56-1				0.49	0.068 5±0.000 1	1.213 5±0.01	0.128 5±0.001 0	883±4	807±8	779±11	97
WH13-56-2				0.42	0.069 0±0.000 2	1.215 5±0.01	0.127 8±0.001 2	900±6	808±6	775±9	96
WH13-56-3				0.34	0.067 8±0.000 1	1.221 7±0.01	0.130 7±0.001 1	863±3	811±5	792±6	98
WH13-56-4				0.63	0.067 4±0.000 2	1.232 4±0.01	0.132 5±0.000 8	852±1	815±4	802±4	98
WH13-56-5				0.22	0.071 4±0.000 2	1.136 9±0.01	0.115 6±0.000 9	969±6	771±6	705±9	91
WH13-56-6				0.36	0.068 9±0.000 2	1.212 0±0.01	0.127 4±0.001 1	894±1	806±5	773±5	96
WH13-56-7				0.42	0.068 3±0.000 2	1.215 8±0.01	0.129 2±0.001 1	876±4	808±7	783±9	97
WH13-56-8				0.59	0.068 7±0.000 1	1.214 2±0.01	0.128 1±0.001 0	900±4	807±6	777±8	96
WH13-56-9				0.44	0.067 6±0.000 2	1.222 4±0.01	0.130 9±0.001 0	857±7	811±6	793±7	98
WH13-56-10				0.37	0.068 8±0.000 2	1.215 9±0.01	0.128 3±0.001 3	892±6	808±5	778±7	96
WH13-56-11				0.38	0.067 9±0.000 2	1.223 3±0.01	0.130 7±0.000 6	865±7	811±3	792±4	98
WH13-56-12				0.58	0.068 5±0.000 3	1.219 8±0.01	0.129 4±0.001 1	885±9	810±7	784±9	97
WH13-56-13				0.32	0.069 3±0.000 2	1.216 7±0.01	0.127 3±0.001 0	907±10	808±9	772±12	96
WH13-56-14				0.48	0.068 9±0.000 2	1.223 2±0.01	0.128 9±0.001 0	894±1	811±4	781±5	96
WH13-56-15				0.51	0.070 5±0.000 2	1.226 9±0.01	0.126 3±0.001 2	943±6	813±8	767±11	94
WH13-56-16				0.32	0.073 3±0.000 4	1.124 3±0.01	0.110 7±0.001 1	1 020±11	765±7	677±6	88
WH13-56-17				0.40	0.066 7±0.000 2	1.242 0±0.01	0.135 0±0.000 9	828±1	820±4	816±5	100

注:分析点以 WL15-3 或 WH13-52 开头的为花岗岩闪长岩,以 WH13-54 或 WH13-56 开头的为二长花岗岩; $w(\cdot)$ 为元素或化合物含量; $N(\cdot)/N(\cdot)$ 为同一元素同位素比值; $N(\cdot)$ 为该元素的原子丰度; $n(\cdot)/n(\cdot)$ 为不同元素同位素比值, $n(\cdot)$ 为元素的物质的量。

的锆石多为柱状自形晶,长宽比为 2~3。据阴极发光图像差异可将锆石大致分为两类[图 4(b)]:第一类锆石具核-幔-边结构,核部多为形态不规则的暗色残核,幔部发育较为清晰的生长环带,显示岩浆成因特征<sup>[32]</sup>,受后期变质变形作用影响,局部振荡环带轻微模糊化,边部为细窄的亮灰色边,可能是变质变形或





圆圈和数字代表分析点位和编号

图4 锆石阴极发光图像

Fig. 4 CL Images of Zircons

流体改造的产物;第二类锆石发育核-边结构,其核部占晶体的绝大部分,发育生长环带,显示岩浆成因特征<sup>[32]</sup>,边部为细窄的亮灰色边,可能为变质变形或流体改造的产物。两类锆石中环带发育较好部位的14个分析点 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值为0.16~0.85(表1),也显示岩浆成因特征<sup>[33-34]</sup>。这14个分析点位于谐和曲线下方,显示锆石受后期事件影响发生不同程度的Pb丢失,但它们可拟合成一条线性关系较好(MSWD值为0.39)的不一致线,其上交点年龄为 $(863\pm4)\text{Ma}$ [图5(c)],代表了花岗闪长岩侵位年龄。

#### 4.1.2 二长花岗岩

样品WH13-54( $37^{\circ}8'49.45''\text{N}$ ,  $98^{\circ}43'33.03''\text{E}$ )中的锆石阴极发光图像显示其可分为两类。第一类锆石呈半自形—自形柱状晶体,长宽比介于1~2之间,发育核-幔-边结构。核部多呈不规则状,为原岩锆石部分熔融残晶;幔部呈现较典型的生长环带,显示岩浆成因特征<sup>[32]</sup>;边部为较窄的亮色边,无环带,可能是变质变形或流体改造的产物[图4(c)]。第二类锆石呈较好的短柱状,无环带或呈扇形环带[图4(c)],显示变质成因特征<sup>[32]</sup>。第一类锆石中振荡环带保存相对较好部位的13个分析点 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值介于0.14~0.57之间(表1),进一步指示

岩浆成因特征<sup>[33-34]</sup>。在锆石U-Pb年龄谐和曲线上,除少数分析点落在谐和曲线下方外,大部分分析点群集在谐和曲线上或附近。全部13个分析点拟合得到一条线性关系较好的不一致线,上交点年龄为 $(839\pm15)\text{Ma}$ (MSWD值为0.23)[图5(d)]。落在谐和曲线上的8个分析点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(830\pm8)\text{Ma}$ (MSWD值为1.4)[图5(e)],在误差范围内与上交点年龄一致。 $(830\pm8)\text{Ma}$ 被解释为锆石结晶年龄。第二类锆石10个分析点 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值除1个分析点(WH13-54-2)为0.11外,其余分析点介于0.03~0.10之间,均小于0.10,显示变质成因特征<sup>[32]</sup>。在锆石U-Pb年龄谐和曲线上,这10个分析点都落在谐和曲线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于 $(459\pm4)\sim(471\pm4)\text{Ma}$ 之间,加权平均值为 $(463\pm3)\text{Ma}$ (MSWD值为0.65)[图5(d)]。 $(463\pm3)\text{Ma}$ 与区域上报道的早古生代低压高温高角闪岩相变质作用年龄<sup>[22-23]</sup>相吻合。结合锆石 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值和阴极发光图像特征, $(463\pm3)\text{Ma}$ 被解释为岩体发生早古生代变质作用的年龄。

样品WH13-56( $37^{\circ}7'13.31''\text{N}$ ,  $98^{\circ}43'18.51''\text{E}$ )中的锆石多为半自形—自形柱状晶体,长宽比在2~3之间,普遍发育核-边结构,核部占晶体的绝大



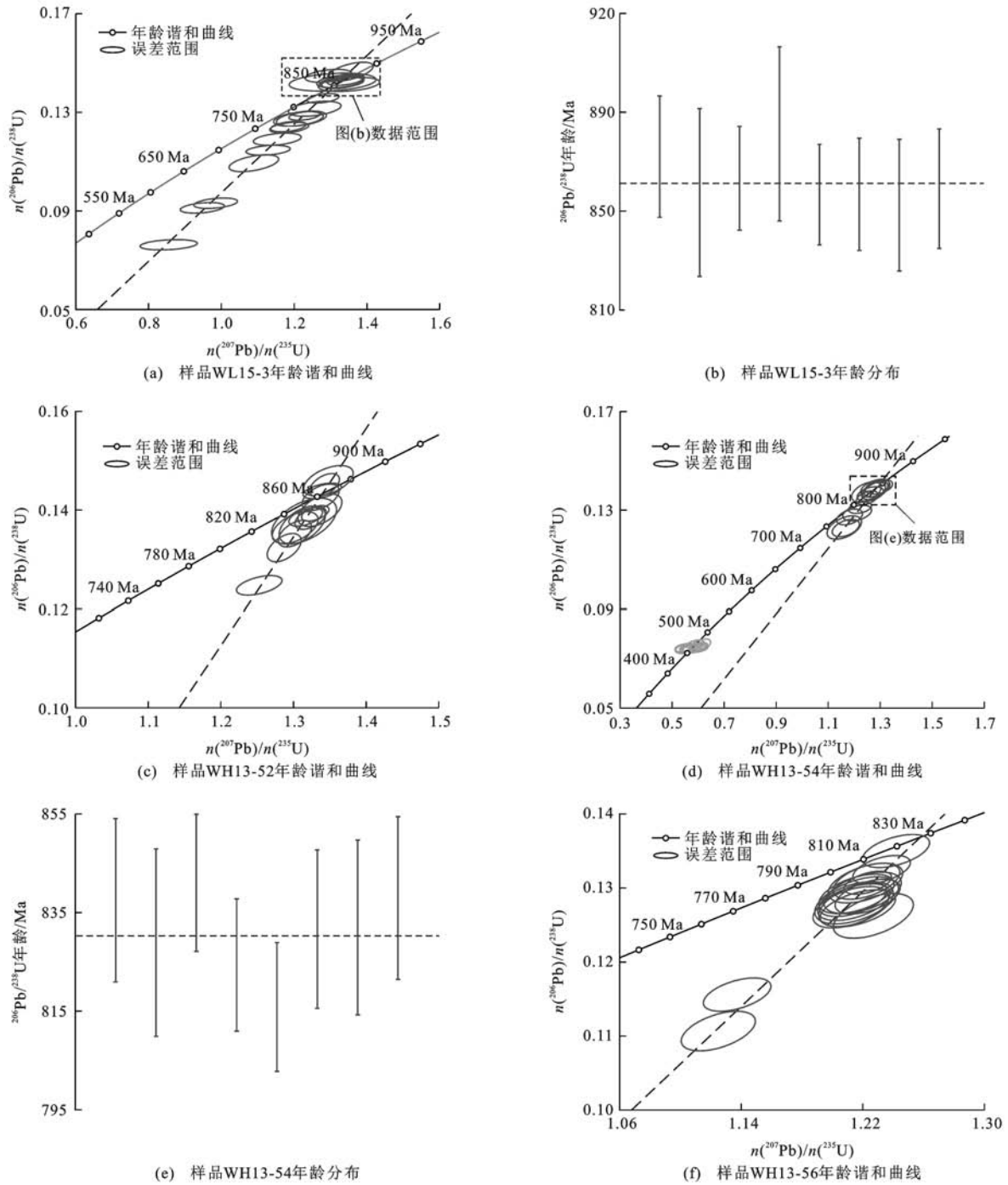


图5 锆石 U-Pb 年龄谐和曲线和年龄分布

Fig. 5 Concordia Diagrams of Zircon U-Pb Ages and Distributions of Ages

部分,振荡环带较为发育,显示岩浆成因特征<sup>[32]</sup>,受后期变质变形作用的影响,大部分锆石晶体的环带发生了不同程度的模糊化。锆石边部为较窄的亮色边,部分呈残缺不全的镶边状,无环带,可能为变质增生或重结晶作用形成的变质边[图4(d)]。此外,少数锆石可见形态不规则的亮色残核,可能为继承性锆石核。该样品17个分析点的 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值介于0.22~0.63之间(表1),显示岩浆成因特

征<sup>[33-34]</sup>。从锆石 U-Pb 年龄谐和曲线[图5(f)]可以看出,除分析点 WH13-56-17 外,其余所有分析点均落入谐和曲线下方,表明锆石受后期变质变形作用影响普遍发生 Pb 丢失,与锆石核部振荡环带普遍模糊化的现象一致。虽然基本上所有分析点都偏离谐和曲线,但这些分析点构成了一条线性关系较好的不一致线,拟合的不一致线与谐和曲线的上交点年龄为 $(827 \pm 6) \text{ Ma}$ (MSWD 值为 0.83),

被解释为锆石结晶年龄。

综上所述,来自柯柯沙花岗岩体花岗闪长岩两件样品的锆石结晶年龄约为 860 Ma,二长花岗岩两件样品的锆石结晶年龄约为 830 Ma,变质锆石年龄约为 460 Ma。结合马建军等报道的二长花岗岩两件样品的锆石年龄((810±7)Ma 和(826±6)Ma,未发表),该岩体在变质之前为一个复式侵入体。考虑到 830 Ma 和 810 Ma 的锆石年龄在误差范围内近于一致,且岩性均为二长花岗岩,初步认为该岩体主要由约 860 Ma 的花岗闪长岩和 810~830 Ma 的二长花岗岩组成。此外,野外地质调查显示两种岩石的片麻理产状基本一致,且岩石样品中的锆石均发育变质增生边,因此,花岗闪长岩和二长花岗岩在侵位后可能均遭受了早古生代变质变形作用的改造。

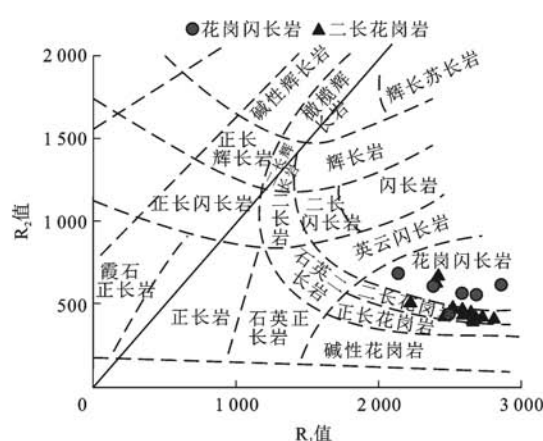
#### 4.2 全岩主、微量元素特征

6 件花岗闪长岩样品和 13 件二长花岗岩样品的全岩主、微量元素分析结果见表 2。

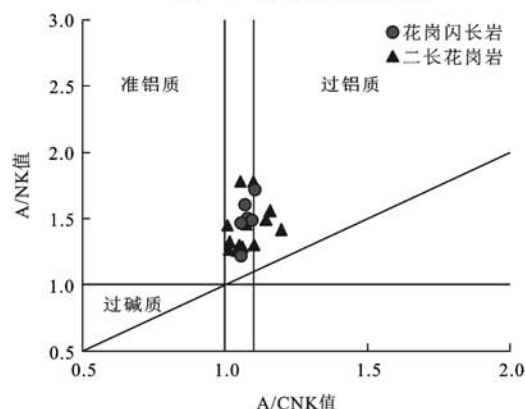
##### 4.2.1 花岗闪长岩

6 件花岗闪长岩样品  $\text{SiO}_2$  含量为 65.30%~72.80%, $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 13.40%~15.89%,全碱含量( $w(\text{K}_2\text{O}) + w(\text{Na}_2\text{O})$ )为 6.16%~8.72%, $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量为 2.03%~5.34%, $\text{MgO}$  含量为 0.46%~1.39%, $\text{P}_2\text{O}_5$  含量为 0.06%~0.08%。在  $R_1$ - $R_2$  岩石类型分类图解中,绝大多数样品落入花岗闪长岩区[图 6(a)],与岩相学观察结果一致。全部样品的铝饱和指数(A/CNK)为 1.06~1.11[图 6(b)],在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解中有 5 件样品落入高钾钙碱性-钾玄岩系列区域[图 6(c)]。上述结果指示花岗闪长岩具高 Si,富碱,贫 Fe、Mg 的主量元素特征,属于弱过铝质、高钾钙碱性-钾玄岩系列。

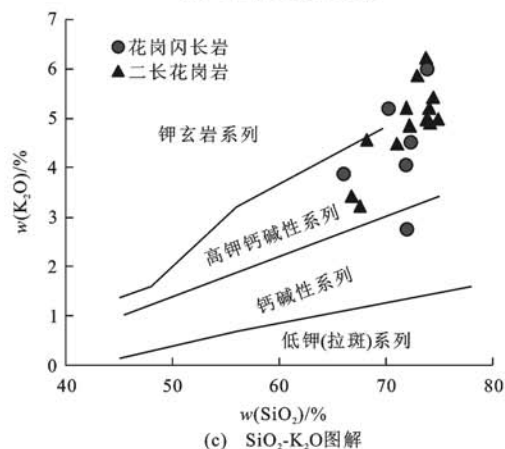
花岗闪长岩稀土元素总含量介于(95.6~180.0)× $10^{-6}$ 之间,Eu 异常(0.87~1.26)从不明显到正异常,轻、重稀土元素分馏不明显( $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$  值为 2.60~10.30),其球粒陨石标准化稀土元素配分模式为轻稀土元素相对富集、中稀土元素相对亏损、重稀土元素相对平坦( $w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$  值为 2.97~8.42, $w(\text{Gd})_N/w(\text{Yb})_N$  值为 0.48~1.50)的右倾型配分曲线[图 7(a)]。中稀土元素的亏损可能与岩浆源区角闪石的残留或角闪石的分离结晶有关<sup>[35]</sup>。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上,各样品相对富集 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素,Nb、Ta、Th、U 等高场强元素以及 Sr、P、Ti 显示明显负异常[图 7(b)]。Sr 负异常和 Ba 正异常表明岩浆源区的部分熔融程度不高,或长石类矿物的结晶分离作用较弱。



(a)  $R_1$ - $R_2$  岩石类型分类图解



(b) A/NK-A/CNK 图解



(c)  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解

图(a)引自文献[36];图(b)引自文献[37];图(c)引自文献[38]

图 6 主量元素图解

Fig. 6 Diagrams of Major Elements

##### 4.2.2 二长花岗岩

13 件二长花岗岩样品的  $\text{SiO}_2$  含量为 65.90%~74.08%, $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 12.75%~16.22%,A/CNK 值为 1.00~1.22,属于过铝质花岗岩。岩石样品相对富 K、低 Na, $\text{K}_2\text{O}$  含量为 3.17%~6.16%, $\text{Na}_2\text{O}$  含量为 2.28%~3.38%, $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$  值为 0.94~2.70, $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量为 1.84%~5.63%, $\text{MgO}$  含量为 0.32%~1.35%;相比于花岗闪长岩,其

表 2 主、微量元素分析结果

Tab. 2 Analysis Results of Major and Trace Elements

样品编号	CNWL 16-10B	CNWL 16-11B	CNWL 16-12	WH13- 52	WH13- 53	WL15- 3	MJ15- 1	MJ15- 2	MJ15- 3	MJ15- 4	MJ15- 5	MJ15- 7	MJ15- 8	MJ15- 9	CNWL 16-10A	WH13- 54	WH13- 55	WH13- 56	WH13- 57
岩性	花岗闪长岩						二长花岗岩												
$w(\text{SiO}_2)/\%$	69.32	71.62	71.10	65.30	72.80	71.15	72.98	73.89	71.37	72.11	66.68	67.65	71.19	65.90	73.26	73.34	74.08	70.57	72.99
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	15.26	14.40	14.52	15.89	13.40	14.77	13.37	13.58	14.44	13.61	16.22	16.00	14.41	15.49	13.15	13.24	12.75	14.32	14.34
$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	2.93	2.68	2.76	5.34	2.03	3.00	1.84	1.96	2.82	2.48	4.14	4.14	2.74	5.63	2.55	2.10	2.36	3.42	1.86
$w(\text{MgO})/\%$	0.70	0.57	0.64	1.39	0.46	0.68	0.43	0.32	0.58	0.48	0.94	1.06	0.50	1.35	0.39	0.44	0.44	0.56	0.48
$w(\text{CaO})/\%$	2.10	2.14	2.19	2.78	1.02	2.67	1.55	1.09	1.67	1.29	3.49	2.00	1.98	3.00	1.25	1.74	1.32	2.50	1.06
$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	2.76	2.79	3.27	3.41	2.68	3.36	2.28	2.73	2.65	2.67	3.38	3.19	2.53	3.01	2.75	2.80	2.64	3.00	2.84
$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	5.14	4.47	4.02	3.84	5.92	2.73	6.16	5.38	4.79	5.79	3.17	4.52	5.16	3.38	5.14	4.86	4.93	4.45	4.92
$w(\text{MnO})/\%$	0.06	0.05	0.06	0.09	0.04	0.07	0.03	0.05	0.06	0.04	0.08	0.07	0.06	0.09	0.06	0.05	0.04	0.06	0.04
$w(\text{TiO}_2)/\%$	0.46	0.37	0.40	0.84	0.26	0.41	0.22	0.24	0.38	0.34	0.49	0.47	0.39	0.78	0.36	0.29	0.30	0.37	0.24
$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	0.07	0.06	0.07	0.08	0.06	0.06	0.12	0.11	0.09	0.06	0.11	0.12	0.08	0.08	0.07	0.12	0.13	0.11	0.13
烧失量/%	1.05	0.78	0.89	1.20	0.92	0.93	0.94	0.59	1.04	1.05	1.17	0.68	0.81	1.13	0.96	1.02	0.96	0.74	1.18
$w_{\text{total}}/\%$	99.84	99.93	99.91	100.16	99.59	99.85	99.91	99.93	99.88	99.93	99.87	99.89	99.86	99.83	99.93	100.00	99.95	100.10	100.08
A/CNK 值	1.09	1.08	1.06	1.07	1.06	1.11	1.01	1.10	1.15	1.04	1.06	1.16	1.08	1.10	1.06	1.01	1.05	1.00	1.20
$w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$	1.86	1.60	1.23	1.13	2.21	0.81	2.70	1.97	1.81	2.17	0.94	1.42	2.04	1.12	1.87	1.74	1.87	1.48	1.73
$(w(\text{K}_2\text{O}) + w(\text{Na}_2\text{O}))/\%$	8.00	7.33	7.37	7.33	8.72	6.16	8.53	8.16	7.53	8.56	6.64	7.77	7.76	6.46	7.97	7.74	7.65	7.50	7.85
$R_1$ 值	2 379	2 680	2 580	2 109	2 489	2 892	2 587	2 659	2 642	2 459	2 415	2 220	2 585	2 406	2 657	2 723	2 806	2 517	2 680
$R_2$ 值	565	544	556	685	400	616	454	401	496	434	748	585	525	701	415	473	417	580	423
Mg <sup>#</sup> 值	35.64	32.99	35.09	37.76	34.56	34.68	35.37	27.83	32.30	31.26	34.50	37.48	30.01	35.85	26.51	32.81	30.29	27.62	37.56
$w(\text{Be})/10^{-6}$	0.94	0.91	0.92	1.29	0.69	0.63	1.02	0.75	1.06	1.08	1.39	0.95	1.13	1.04	0.56	0.89	1.34	1.42	0.52
$w(\text{Sc})/10^{-6}$	7.98	8.44	8.67	15.47	6.22	9.72	4.92	4.19	6.66	7.04	9.19	8.07	7.75	16.30	5.44	6.65	3.88	10.90	8.31
$w(\text{V})/10^{-6}$	30.7	31.0	29.8	63.1	17.6	35.0	16.7	11.5	24.1	22.4	40.1	37.9	27.7	67.8	20.8	18.1	15.1	22.1	14.4
$w(\text{Cr})/10^{-6}$	12.80	11.70	10.10	26.70	6.26	14.10	6.15	4.82	10.20	10.30	15.60	21.30	11.10	26.70	7.75	7.29	5.56	5.95	5.77
$w(\text{Co})/10^{-6}$	5.95	4.76	4.77	106.50	134.30	165.00	2.78	2.43	3.96	3.52	7.02	8.40	4.67	10.95	3.64	136.40	166.60	103.90	162.40
$w(\text{Ni})/10^{-6}$	6.34	4.32	3.44	12.53	3.40	67.09	3.45	2.05	4.25	4.02	7.41	8.80	4.09	9.75	4.74	4.08	4.35	3.99	3.38
$w(\text{Cu})/10^{-6}$	6.46	1.36	4.08	10.55	1.52	3.03	4.32	1.72	3.31	2.89	6.98	4.16	3.75	10.76	4.52	1.48	2.20	25.85	1.16
$w(\text{Zn})/10^{-6}$	41.9	35.2	33.6	66.4	16.2	37.7	26.4	26.5	41.9	33.1	46.2	43.3	34.8	71.8	22.0	21.5	27.9	45.3	31.4
$w(\text{Ga})/10^{-6}$	18.5	15.6	16.1	19.6	14.2	16.9	17.7	16.6	16.0	16.7	19.0	18.4	18.6	19.8	14.4	16.4	17.1	18.0	17.2
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	125	126	128	115	189	51	331	211	156	228	88	138	150	116	120	149	215	168	244
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	178	113	112	198	115	202	224	96	140	84	198	141	143	169	96	122	72	169	85
$w(\text{Y})/10^{-6}$	28.5	28.6	32.8	49.8	43.7	39.4	24.5	50.6	38.7	43.3	33.0	26.0	37.0	39.4	37.0	72.0	54.0	52.0	42.3
$w(\text{Zr})/10^{-6}$	186	133	141	317	110	153	84	121	168	192	193	184	194	288	110	144	148	223	122
$w(\text{Nb})/10^{-6}$	8.16	5.53	6.19	15.98	4.37	6.04	2.73	5.37	6.90	7.57	8.89	8.76	7.28	14.11	7.15	4.76	9.00	7.98	15.85
$w(\text{Cs})/10^{-6}$	0.87	0.85	0.69	1.82	1.99	1.12	1.87	1.61	2.76	1.70	1.23	0.53	0.95	1.57	0.45	1.82	1.20	0.69	1.75
$w(\text{Ba})/10^{-6}$	1 450.0	567.3	594.6	1 322.0	768.5	1 172.0	561.3	483.6	841.1	441.2	869.1	805.6	1 085.0	1 233.0	508.7	665.1	417.5	710.8	433.4
$w(\text{La})/10^{-6}$	41.6	22.7	22.6	38.3	20.7	28.8	22.7	28.3	38.2	34.9	41.3	43.6	44.8	62.5	23.6	47.9	31.4	31.4	36.0
$w(\text{Ce})/10^{-6}$	75.2	39.3	39.4	69.0	32.4	46.3	41.1	57.2	73.4	60.8	76.2	84.4	85.2	117.0	44.4	100.0	68.9	61.5	80.0
$w(\text{Pr})/10^{-6}$	8.06	4.03	4.28	7.03	3.22	4.64	4.68	6.50	8.14	6.27	8.33	9.55	9.31	13.13	4.95	10.48	7.82	6.57	9.18



续表 2

样品编号	CNWL 16-10B	CNWL 16-11B	CNWL 16-12	WH13- 52	WH13- 53	WL15- 3	MJ15- 1	MJ15- 2	MJ15- 3	MJ15- 4	MJ15- 5	MJ15- 7	MJ15- 8	MJ15- 9	CNWL 16-10A	WH13- 54	WH13- 55	WH13- 56	WH13- 57
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	29.1	15.9	15.8	25.6	12.0	16.7	18.2	24.1	29.8	21.9	30.2	35.6	34.3	47.7	18.6	39.3	29.7	24.9	34.3
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	5.09	3.05	3.43	4.67	2.42	2.97	4.06	5.40	6.11	4.12	5.64	6.97	6.49	8.07	4.20	7.27	7.41	5.27	7.72
$w(\text{Eu})/10^{-6}$	1.93	0.98	1.18	1.53	0.85	1.45	0.73	0.77	1.22	0.87	1.57	1.47	1.56	1.99	0.70	1.06	0.66	1.18	0.71
$w(\text{Gd})/10^{-6}$	5.25	3.89	4.16	5.00	3.30	4.18	4.18	6.09	6.31	4.93	5.82	6.25	6.89	8.11	5.10	6.52	7.69	6.18	6.97
$w(\text{Tb})/10^{-6}$	0.88	0.69	0.84	1.00	0.71	0.81	0.71	1.17	1.04	1.03	0.90	0.87	1.08	1.18	0.95	1.24	1.42	1.24	1.21
$w(\text{Dy})/10^{-6}$	5.00	4.66	5.20	7.42	6.02	6.10	4.61	8.16	6.69	6.89	5.57	4.89	6.67	7.02	6.39	9.49	9.05	8.59	7.28
$w(\text{Ho})/10^{-6}$	1.09	0.96	1.22	1.76	1.50	1.40	0.91	1.72	1.36	1.56	1.13	0.89	1.32	1.43	1.28	2.41	1.82	1.82	1.38
$w(\text{Er})/10^{-6}$	3.02	2.94	3.66	5.91	5.13	4.57	2.57	5.25	3.99	4.80	3.40	2.43	3.81	4.30	3.76	8.64	5.33	5.35	4.00
$w(\text{Tm})/10^{-6}$	0.51	0.46	0.64	0.92	0.83	0.74	0.37	0.79	0.58	0.79	0.50	0.34	0.56	0.65	0.56	1.41	0.77	0.80	0.61
$w(\text{Yb})/10^{-6}$	2.90	3.25	3.79	6.69	5.71	5.13	2.30	4.89	3.64	4.63	3.21	2.06	3.60	4.34	3.68	9.71	4.69	4.97	3.92
$w(\text{Lu})/10^{-6}$	0.49	0.50	0.62	1.04	0.84	0.78	0.33	0.69	0.53	0.74	0.49	0.30	0.54	0.68	0.54	1.45	0.65	0.74	0.57
$w(\text{Hf})/10^{-6}$	6.92	4.05	4.60	8.54	3.35	5.37	3.58	4.74	5.97	6.97	6.39	6.39	6.76	9.66	4.52	4.07	4.68	5.92	3.81
$w(\text{Ta})/10^{-6}$	1.30	0.45	0.99	1.10	0.48	1.71	0.15	0.32	0.42	0.99	0.55	0.43	0.44	0.82	0.46	0.55	0.78	0.60	1.02
$w(\text{Pb})/10^{-6}$	32.5	26.9	21.6	24.1	25.6	25.0	14.7	25.8	27.2	19.3	26.1	19.5	35.1	15.3	27.7	30.1	25.8	16.3	31.2
$w(\text{Th})/10^{-6}$	8.68	0.65	0.81	6.26	1.52	1.23	1.09	11.30	8.43	7.95	3.47	12.70	16.20	20.40	4.47	26.40	20.70	2.15	24.10
$w(\text{U})/10^{-6}$	0.41	0.27	0.24	0.49	0.29	0.33	0.48	0.76	0.47	0.76	0.34	1.19	0.40	0.56	0.31	0.52	2.53	0.32	6.97
$w_{\text{REE}}/10^{-6}$	180.0	103.0	107.0	176.0	95.6	125.0	107.0	151.0	181.0	154.0	184.0	200.0	206.0	278.0	119.0	247.0	177.0	161.0	194.0
$w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$	8.42	4.95	4.30	4.91	2.97	4.25	5.73	4.25	6.50	5.08	7.77	10.10	7.42	9.04	4.33	5.04	4.64	4.41	6.47
Eu 异常	1.13	0.87	0.95	0.96	0.92	1.26	0.53	0.41	0.60	0.59	0.83	0.67	0.71	0.75	0.46	0.46	0.27	0.63	0.29
$w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$	10.30	5.01	4.27	4.10	2.60	4.03	7.08	4.15	7.54	5.41	9.24	15.20	8.92	10.30	4.60	3.54	4.80	4.54	6.59
$w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$	1.50	0.99	0.91	0.62	0.48	0.67	1.51	1.03	1.43	0.88	1.50	2.51	1.58	1.55	1.15	0.56	1.36	1.03	1.47
$t_{\text{Zr}}/^\circ\text{C}$	801	773	775	841	757	787	731	771	800	803	796	803	806	837	758	776	784	809	778

注:  $w_{\text{total}}$  为主量元素总含量;  $w_{\text{REE}}$  为稀土元素总含量;  $w_{\text{LREE}}$  为轻稀土元素总含量;  $w_{\text{HREE}}$  为重稀土元素总含量;  $w(\cdot)_{\text{N}}$  为元素含量球粒陨石标准化后的值;  $R_1$  值和  $R_2$  值计算方法引自文献[36];  $t_{\text{Zr}} = 12\,900 / (\ln D_{\text{Zr}} + 0.85M + 2.95) - 273$ ,  $D_{\text{Zr}}$  为化学计量锆石中 Zr 含量与熔体中 Zr 含量之比,  $M = (N(\text{Na}) + N(\text{K}) + 2N(\text{Ca})) / (N(\text{Al}) + N(\text{Si}))$ , 令  $N(\text{Si}) + N(\text{Al}) + N(\text{Fe}) + N(\text{Mg}) + N(\text{Ca}) + N(\text{Na}) + N(\text{K}) + N(\text{P}) = 1$ 。

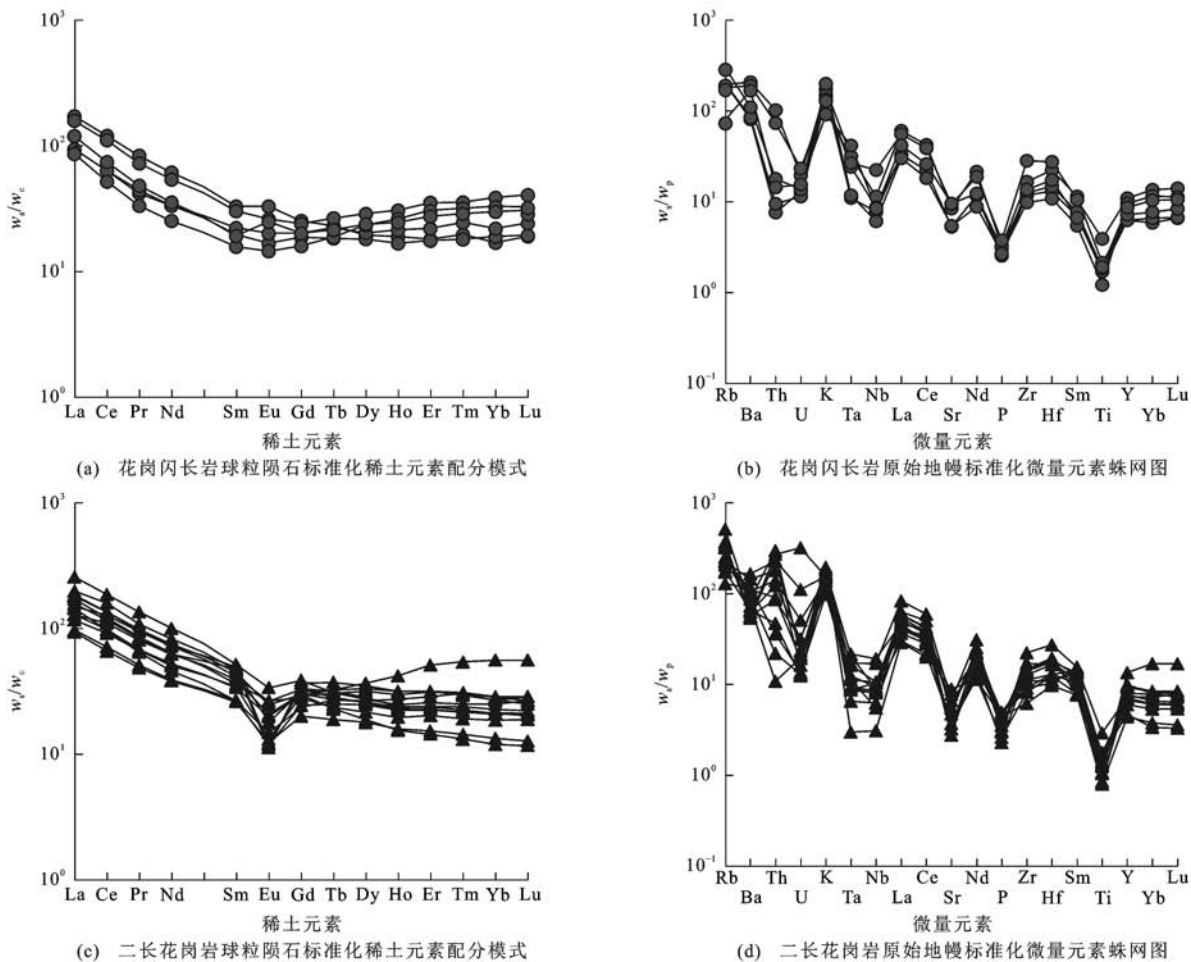
$\text{P}_2\text{O}_5$  含量在部分样品中较高且变化较大(0.06%~0.13%)。在  $R_1$ - $R_2$  岩石类型分类图解中, 样品主体落入二长花岗岩区[图 6(a)], 与岩相学观察结果一致; 在 A/NK-A/CNK 图解中, 所有样品显示出弱—强过铝质岩石特征[图 6(b)]; 在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解中, 样品主体落入高钾钙碱性-钾玄岩系列区域[图 6(c)]。综上所述, 二长花岗岩同样具有高 Si, 富碱, 贫 Fe、Mg 的主量元素特征, 但为弱—强过铝质的高钾钙碱性-钾玄岩系列。

岩石稀土元素总含量变化相对较大, 为  $(107.0 \sim 278.0) \times 10^{-6}$ , 强—中等负 Eu 异常(0.27~0.83), 轻、重稀土元素分馏程度不明显( $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$  值为 3.54~15.20, 仅样品 MJ15-7 和 MJ15-9 偏大), 球粒陨石标准化稀土元素配分模式表现为轻稀土元素相对富集、重稀土元素相对亏损的右倾型配分曲线( $w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$  值为 4.25~10.10,  $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$  值

为 0.56~2.51)[图 7(c)]。样品 WH13-54 重稀土元素含量相对较高, 导致在稀土元素配分模式上重稀土元素部分曲线呈上升趋势, 这可能与样品中含有较多石榴石有关。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上, 各样品富集 Rb、K 等大离子亲石元素和 Th、Zr、Hf 等高场强元素, 与相邻元素相比, Nb、Ta、Sr、P、Ti、Ba 明显亏损[图 7(d)]。Ba、Sr 亏损可能是由于岩浆起源于斜长石稳定区或斜长石的分离结晶作用, Ti 亏损可能与钛铁矿的分离结晶作用有关。

#### 4.3 锆石 Hf 同位素特征

对两件花岗闪长岩的锆石样品(WL15-3 和 WH13-52)和 3 件二长花岗岩的锆石样品(MJ15-1、MJ15-9 和 WH13-56)分别进行 Hf 同位素分析(表 3)。样品 MJ15-1 和 MJ15-9 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为  $(810 \pm 7)\text{Ma}$  和  $(826 \pm 6)\text{Ma}$ (未发表)。本文采用球粒陨石  $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$  值



$w_s$  为样品含量;  $w_c$  为球粒陨石含量;  $w_p$  为原始地幔含量; 球粒陨石标准化值和原始地幔标准化值引自文献[39]; 同一图中相同线条对应不同样品

图7 球粒陨石标准化稀土元素配分模式和原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 7 Chondrite-normalized REE Patterns and Primitive Mantle-normalized Trace Element Spider Diagrams

(0.282 772<sup>[40]</sup>) 和  $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$  值(0.033 2<sup>[40]</sup>) 计算  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值, 用亏损地幔  $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$  值(0.283 25<sup>[41]</sup>) 和  $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$  值(0.038 4<sup>[41]</sup>) 计算亏损地幔模式年龄( $T_{\text{DM1}}$ ), 用平均地壳  $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$  值(0.015<sup>[42]</sup>) 计算二阶段模式年龄( $T_{\text{DM2}}$ )。

#### 4.3.1 花岗闪长岩

样品 WL15-3 和 WH13-52 各分析点  $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$  值除一个分析点略大于 0.002 外, 其余分析点为 0.000 163~0.001 757, 均小于 0.002, 表明锆石结晶后基本没有放射性成因 Hf 的积累, 因此, 可以用测试所得的  $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$  值代表锆石形成时体系中的 Hf 同位素组成<sup>[42]</sup>。样品 Hf 富集系数( $f_{\text{Lu/Hf}}$ )介于-1.00~-0.94 之间, 平均值为-0.96, 明显低于镁铁质地壳的  $f_{\text{Lu/Hf}}$  值(-0.34)<sup>[43]</sup> 和硅铝质地壳的  $f_{\text{Lu/Hf}}$  值(-0.72)<sup>[44]</sup>, 因而二阶段模式年龄更能反映岩石源区物质从亏损地幔中被抽取出来的时间<sup>[45]</sup>。Hf 同位素初始比值( $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$ )介

于 0.282 159~0.282 318 之间,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值介于-2.7~2.9 之间, 二阶段模式年龄介于 1.57~1.93 Ga 之间, 在锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$  图解中分布于球粒陨石演化线两侧, 偏离亏损地幔演化线(图 8)。

#### 4.3.2 二长花岗岩

二长花岗岩样品各分析点  $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$  值介于 0.000 688~0.001 990 之间,  $f_{\text{Lu/Hf}}$  值介于-0.98~-0.94 之间, 平均值为-0.95。Hf 同位素初始比值介于 0.282 066~0.282 350 之间,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值介于-6.7~3.4 之间, 二阶段模式年龄介于 1.52~2.16 Ga 之间, 在  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$  图解中分布于球粒陨石演化线两侧, 偏离亏损地幔演化线(图 8)。

## 5 讨论

### 5.1 岩石成因

#### 5.1.1 成因类型

柯柯沙花岗岩体中, 花岗闪长岩和二长花岗岩

表 3 锆石 Hf 同位素分析结果

Tab. 3 Analysis Results of Zircon Hf Isotope

分析点	$N(^{176}\text{Hf})/$ $N(^{177}\text{Hf})$	$n(^{176}\text{Lu})/$ $n(^{177}\text{Hf})$	$n(^{176}\text{Yb})/$ $n(^{177}\text{Hf})$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	$(N(^{176}\text{Hf})/$ $N(^{177}\text{Hf}))_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM1}}/$ Ga	$T_{\text{DM2}}/$ Ga	$f_{\text{Lu/Hf}}$
WL15-3-1	$0.282\,225 \pm 0.000\,014$	0.001 330	0.046 642	860	0.282 203	$-1.1 \pm 0.5$	$1.46 \pm 0.04$	$1.83 \pm 0.06$	$-0.96$
WL15-3-2	$0.282\,202 \pm 0.000\,014$	0.001 189	0.040 330	860	0.282 183	$-1.8 \pm 0.5$	$1.49 \pm 0.04$	$1.87 \pm 0.06$	$-0.96$
WL15-3-3	$0.282\,350 \pm 0.000\,014$	0.002 046	0.066 658	860	0.282 317	$2.9 \pm 0.5$	$1.31 \pm 0.04$	$1.57 \pm 0.06$	$-0.94$
WL15-3-5	$0.282\,190 \pm 0.000\,017$	0.000 973	0.032 766	860	0.282 175	$-2.1 \pm 0.6$	$1.50 \pm 0.05$	$1.89 \pm 0.08$	$-0.97$
WL15-3-6	$0.282\,329 \pm 0.000\,014$	0.001 757	0.059 474	860	0.282 301	$2.3 \pm 0.5$	$1.33 \pm 0.04$	$1.61 \pm 0.06$	$-0.95$
WL15-3-8	$0.282\,222 \pm 0.000\,011$	0.001 145	0.037 487	860	0.282 203	$-1.1 \pm 0.4$	$1.46 \pm 0.03$	$1.83 \pm 0.05$	$-0.97$
WL15-3-9	$0.282\,285 \pm 0.000\,013$	0.001 495	0.053 523	860	0.282 261	$0.9 \pm 0.4$	$1.38 \pm 0.04$	$1.70 \pm 0.06$	$-0.95$
WL15-3-10	$0.282\,297 \pm 0.000\,018$	0.001 609	0.051 615	860	0.282 271	$1.3 \pm 0.6$	$1.37 \pm 0.05$	$1.68 \pm 0.08$	$-0.95$
WL15-3-12	$0.282\,315 \pm 0.000\,012$	0.001 123	0.040 356	860	0.282 297	$2.2 \pm 0.4$	$1.33 \pm 0.03$	$1.62 \pm 0.06$	$-0.97$
WL15-3-14	$0.282\,245 \pm 0.000\,015$	0.001 056	0.034 876	860	0.282 228	$-0.2 \pm 0.5$	$1.42 \pm 0.04$	$1.77 \pm 0.07$	$-0.97$
WL15-3-18	$0.282\,210 \pm 0.000\,009$	0.000 856	0.027 223	860	0.282 197	$-1.4 \pm 0.3$	$1.46 \pm 0.02$	$1.84 \pm 0.04$	$-0.97$
WL15-3-20	$0.282\,246 \pm 0.000\,014$	0.001 292	0.040 592	860	0.282 225	$-0.4 \pm 0.5$	$1.43 \pm 0.04$	$1.78 \pm 0.06$	$-0.96$
WH13-52-1	$0.282\,228 \pm 0.000\,029$	0.001 529	0.054 388	860	0.282 204	$-1.1 \pm 1.0$	$1.47 \pm 0.08$	$1.83 \pm 0.13$	$-0.95$
WH13-52-2	$0.282\,263 \pm 0.000\,028$	0.001 576	0.071 204	860	0.282 238	$0.1 \pm 1.0$	$1.42 \pm 0.08$	$1.75 \pm 0.12$	$-0.95$
WH13-52-3	$0.282\,232 \pm 0.000\,023$	0.001 586	0.071 112	860	0.282 206	$-1.0 \pm 0.8$	$1.46 \pm 0.07$	$1.82 \pm 0.10$	$-0.95$
WH13-52-4	$0.282\,312 \pm 0.000\,021$	0.000 163	0.007 760	860	0.282 309	$2.6 \pm 0.8$	$1.30 \pm 0.06$	$1.59 \pm 0.10$	$-1.00$
WH13-52-5	$0.282\,300 \pm 0.000\,024$	0.000 774	0.031 923	860	0.282 287	$1.8 \pm 0.8$	$1.34 \pm 0.07$	$1.64 \pm 0.10$	$-0.98$
WH13-52-6	$0.282\,274 \pm 0.000\,024$	0.001 279	0.049 436	860	0.282 253	$0.6 \pm 0.8$	$1.39 \pm 0.07$	$1.72 \pm 0.11$	$-0.96$
WH13-52-7	$0.282\,239 \pm 0.000\,026$	0.000 958	0.032 927	860	0.282 224	$-0.4 \pm 0.9$	$1.43 \pm 0.07$	$1.78 \pm 0.12$	$-0.97$
WH13-52-8	$0.282\,308 \pm 0.000\,026$	0.000 968	0.040 776	860	0.282 292	$2.0 \pm 0.9$	$1.33 \pm 0.07$	$1.63 \pm 0.11$	$-0.97$
WH13-52-9	$0.282\,299 \pm 0.000\,023$	0.001 027	0.041 887	860	0.282 282	$1.7 \pm 0.8$	$1.35 \pm 0.07$	$1.65 \pm 0.10$	$-0.97$
WH13-52-10	$0.282\,184 \pm 0.000\,031$	0.001 563	0.066 403	860	0.282 159	$-2.7 \pm 1.1$	$1.53 \pm 0.09$	$1.93 \pm 0.14$	$-0.95$
WH13-52-11	$0.282\,275 \pm 0.000\,036$	0.000 418	0.020 391	860	0.282 268	$1.2 \pm 1.3$	$1.36 \pm 0.10$	$1.68 \pm 0.16$	$-0.99$
WH13-52-12	$0.282\,207 \pm 0.000\,027$	0.001 357	0.055 809	860	0.282 185	$-1.8 \pm 0.9$	$1.49 \pm 0.07$	$1.87 \pm 0.12$	$-0.96$
WH13-52-13	$0.282\,327 \pm 0.000\,024$	0.000 536	0.021 852	860	0.282 318	$2.9 \pm 0.9$	$1.29 \pm 0.07$	$1.57 \pm 0.11$	$-0.98$
WH13-52-14	$0.282\,206 \pm 0.000\,026$	0.001 177	0.059 348	860	0.282 187	$-1.7 \pm 0.9$	$1.48 \pm 0.07$	$1.87 \pm 0.11$	$-0.96$
MJ15-1-3	$0.282\,316 \pm 0.000\,011$	0.001 568	0.058 283	830	0.282 292	$1.3 \pm 0.4$	$1.34 \pm 0.03$	$1.65 \pm 0.05$	$-0.95$
MJ15-1-4	$0.282\,292 \pm 0.000\,016$	0.001 960	0.064 020	830	0.282 261	$0.3 \pm 0.6$	$1.39 \pm 0.05$	$1.72 \pm 0.07$	$-0.94$
MJ15-1-5	$0.282\,232 \pm 0.000\,017$	0.001 120	0.042 517	830	0.282 215	$-1.4 \pm 0.6$	$1.44 \pm 0.05$	$1.82 \pm 0.08$	$-0.97$
MJ15-1-6	$0.282\,315 \pm 0.000\,015$	0.001 146	0.041 840	830	0.282 297	$1.5 \pm 0.5$	$1.33 \pm 0.04$	$1.64 \pm 0.06$	$-0.97$
MJ15-1-7	$0.282\,237 \pm 0.000\,014$	0.001 034	0.036 860	830	0.282 221	$-1.2 \pm 0.5$	$1.43 \pm 0.04$	$1.81 \pm 0.06$	$-0.97$
MJ15-1-8	$0.282\,248 \pm 0.000\,010$	0.001 044	0.039 220	830	0.282 232	$-0.8 \pm 0.4$	$1.42 \pm 0.03$	$1.78 \pm 0.05$	$-0.97$
MJ15-1-10	$0.282\,206 \pm 0.000\,017$	0.001 568	0.053 187	830	0.282 181	$-2.6 \pm 0.6$	$1.50 \pm 0.05$	$1.90 \pm 0.07$	$-0.95$
MJ15-1-11	$0.282\,337 \pm 0.000\,011$	0.001 911	0.057 713	830	0.282 307	$1.9 \pm 0.4$	$1.33 \pm 0.03$	$1.62 \pm 0.05$	$-0.94$
MJ15-1-12	$0.282\,196 \pm 0.000\,018$	0.000 688	0.024 231	830	0.282 186	$-2.4 \pm 0.6$	$1.48 \pm 0.05$	$1.89 \pm 0.08$	$-0.98$
MJ15-1-13	$0.282\,321 \pm 0.000\,019$	0.001 864	0.064 313	830	0.282 292	$1.4 \pm 0.7$	$1.35 \pm 0.05$	$1.65 \pm 0.09$	$-0.94$
MJ15-1-14	$0.282\,355 \pm 0.000\,011$	0.001 295	0.042 808	830	0.282 334	$2.8 \pm 0.4$	$1.28 \pm 0.03$	$1.55 \pm 0.05$	$-0.96$
MJ15-1-15	$0.282\,366 \pm 0.000\,018$	0.001 735	0.062 669	830	0.282 339	$3.0 \pm 0.6$	$1.28 \pm 0.05$	$1.54 \pm 0.08$	$-0.95$
MJ15-1-16	$0.282\,380 \pm 0.000\,014$	0.001 949	0.067 426	830	0.282 350	$3.4 \pm 0.5$	$1.26 \pm 0.04$	$1.52 \pm 0.06$	$-0.94$
MJ15-1-17	$0.282\,352 \pm 0.000\,013$	0.001 918	0.060 005	830	0.282 322	$2.4 \pm 0.4$	$1.30 \pm 0.04$	$1.58 \pm 0.06$	$-0.94$



续表 3

分析点	$N(^{176}\text{Hf})/$ $N(^{177}\text{Hf})$	$n(^{176}\text{Lu})/$ $n(^{177}\text{Hf})$	$n(^{176}\text{Yb})/$ $n(^{177}\text{Hf})$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	$(N(^{176}\text{Hf})/$ $N(^{177}\text{Hf}))_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM1}}/$ Ga	$T_{\text{DM2}}/$ Ga	$f_{\text{Lu/Hf}}$
MJ15-9-1	0.282 324±0.000 016	0.001 661	0.066 736	830	0.282 298	1.6±0.5	1.33±0.04	1.63±0.07	-0.95
MJ15-9-5	0.282 292±0.000 019	0.001 477	0.051 843	830	0.282 269	0.5±0.7	1.37±0.05	1.70±0.08	-0.96
MJ15-9-8	0.282 325±0.000 016	0.001 558	0.061 201	830	0.282 300	1.6±0.6	1.33±0.05	1.63±0.07	-0.95
MJ15-9-9	0.282 352±0.000 014	0.001 983	0.070 229	830	0.282 321	2.4±0.5	1.31±0.04	1.58±0.06	-0.94
MJ15-9-11	0.282 219±0.000 018	0.001 740	0.059 491	830	0.282 192	-2.2±0.6	1.49±0.05	1.87±0.08	-0.95
MJ15-9-12	0.282 364±0.000 019	0.001 646	0.112 328	830	0.282 339	3.0±0.7	1.28±0.06	1.54±0.09	-0.95
MJ15-9-15	0.282 304±0.000 016	0.001 266	0.048 623	830	0.282 284	1.1±0.6	1.35±0.05	1.67±0.07	-0.96
MJ15-9-17	0.282 219±0.000 017	0.001 005	0.035 438	830	0.282 204	-1.8±0.6	1.46±0.05	1.85±0.08	-0.97
MJ15-9-18	0.282 291±0.000 014	0.001 542	0.056 841	830	0.282 267	0.5±0.5	1.38±0.04	1.70±0.06	-0.95
MJ15-9-23	0.282 367±0.000 019	0.001 907	0.068 182	830	0.282 337	3.0±0.7	1.28±0.05	1.55±0.08	-0.94
MJ15-9-24	0.282 317±0.000 016	0.001 268	0.047 204	830	0.282 297	1.5±0.6	1.33±0.05	1.64±0.07	-0.96
MJ15-9-25	0.282 264±0.000 015	0.001 545	0.053 063	830	0.282 240	-0.5±0.5	1.42±0.04	1.77±0.07	-0.95
WH13-56-1	0.282 086±0.000 014	0.001 254	0.041 479	830	0.282 066	-6.7±0.5	1.65±0.04	2.16±0.06	-0.96
WH13-56-2	0.282 279±0.000 022	0.001 695	0.072 788	830	0.282 252	-0.1±0.8	1.40±0.06	1.74±0.10	-0.95
WH13-56-3	0.282 258±0.000 017	0.000 948	0.030 146	830	0.282 243	-0.4±0.6	1.40±0.05	1.76±0.08	-0.97
WH13-56-4	0.282 228±0.000 017	0.001 176	0.037 961	830	0.282 210	-1.6±0.6	1.45±0.05	1.83±0.08	-0.96
WH13-56-6	0.282 200±0.000 022	0.001 990	0.079 810	830	0.282 169	-3.0±0.8	1.52±0.06	1.93±0.10	-0.94
WH13-56-7	0.282 254±0.000 013	0.001 970	0.111 323	830	0.282 223	-1.1±0.5	1.45±0.04	1.80±0.06	-0.94
WH13-56-8	0.282 222±0.000 019	0.001 296	0.046 828	830	0.282 202	-1.9±0.7	1.47±0.05	1.85±0.09	-0.96
WH13-56-9	0.282 116±0.000 012	0.001 466	0.049 037	830	0.282 093	-5.7±0.4	1.62±0.03	2.10±0.05	-0.96
WH13-56-10	0.282 261±0.000 017	0.001 259	0.047 158	830	0.282 241	-0.5±0.6	1.41±0.05	1.76±0.08	-0.96
WH13-56-11	0.282 124±0.000 012	0.001 352	0.060 424	830	0.282 102	-5.4±0.4	1.61±0.03	2.07±0.05	-0.96
WH13-56-12	0.282 188±0.000 016	0.001 910	0.068 652	830	0.282 158	-3.4±0.6	1.54±0.05	1.95±0.07	-0.94
WH13-56-13	0.282 201±0.000 017	0.001 952	0.068 808	830	0.282 170	-3.0±0.6	1.52±0.05	1.92±0.08	-0.94
WH13-56-14	0.282 308±0.000 020	0.001 984	0.089 864	830	0.282 277	0.8±0.7	1.37±0.06	1.68±0.09	-0.94
WH13-56-15	0.282 220±0.000 017	0.001 445	0.062 731	830	0.282 197	-2.0±0.6	1.47±0.05	1.86±0.08	-0.96
WH13-56-17	0.282 167±0.000 016	0.001 484	0.047 954	830	0.282 144	-3.9±0.6	1.55±0.05	1.98±0.07	-0.96

注:分析点以 WL15-3 或 WH13-52 开头的为花岗闪长岩,以 MJ15-1、MJ15-9 或 WH13-56 开头的为二长花岗岩; $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为年龄  $t$  对应的  $\epsilon_{\text{Hf}}$  值。

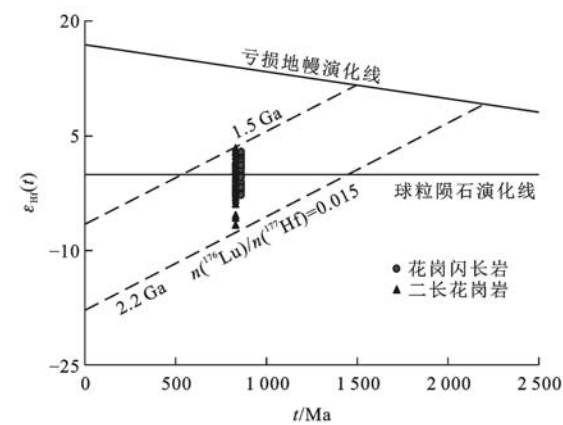
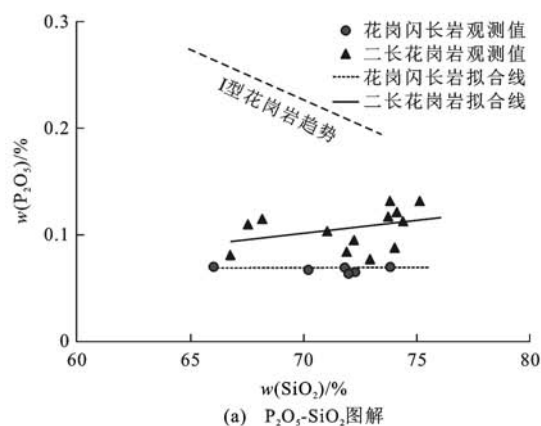


图 8  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $t$  图解

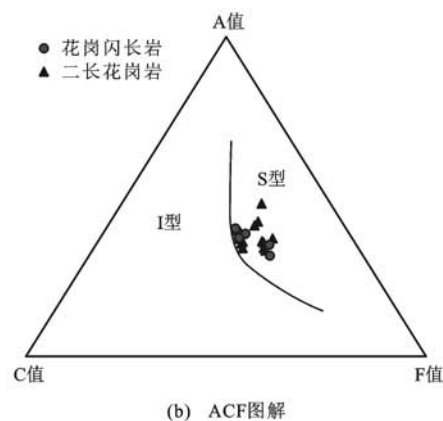
Fig. 8 Diagram of  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $t$

在岩石组合上不与蛇绿岩、石英正长岩或正长岩共生,在矿物组成上其暗色矿物主要为石榴石和黑云母,无碱性暗色矿物,指示其不可能属于 M 型或 A 型花岗岩。虽然岩体中花岗闪长岩和二长花岗岩富含 Mg、Fe 的铝硅酸盐矿物石榴石,然而越来越多的研究发现,富含石榴石和 A/CNK 值高于 1.1 并非是鉴定 S 型花岗岩的有效标志<sup>[46-49]</sup>。实验岩石学研究表明,通常岩浆中磷灰石的溶解度随着岩浆温度的降低和固结度的增高而降低<sup>[50]</sup>,磷灰石易溶于强过铝长英质熔体中,因此,磷灰石可能在非过铝质岩浆的早期熔体阶段分离结晶而使其在岩浆演化过程中呈现出体积分数逐渐降低的趋势,相反在过铝质岩浆中则呈现出逐渐升高

的特征<sup>[51-52]</sup>。在硅酸盐熔体中,磷灰石是P元素主要的矿物载体,P元素在熔体中扩散程度主要受控于磷灰石的溶解度<sup>[50]</sup>;在I型和S型花岗岩中P元素的含量与SiO<sub>2</sub>含量分别成负相关和正相关演化关系。利用P元素这一地球化学行为差异可以有效区分I型和S型花岗岩<sup>[53-55]</sup>。



研究表明,柯柯沙花岗闪长岩样品中的P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量随SiO<sub>2</sub>含量的增加基本保持不变,二长花岗岩样品则呈现出明显升高的趋势,这与S型花岗岩演化趋势一致[图9(a)]。此外,在ACF图解中,柯柯沙花岗岩体所有样品均落入S型花岗岩区域[图9(b)],进一步表明柯柯沙花岗岩可能属于S型花岗岩。



A 值为  $n(\text{Al}_2\text{O}_3) + n(\text{Fe}_2\text{O}_3) - (n(\text{Na}_2\text{O}) + n(\text{K}_2\text{O}))$ ; C 值为  $n(\text{CaO}) - 3.3n(\text{P}_2\text{O}_5)$ ; F 值为  $n(\text{MgO}) + n(\text{FeO}) + n(\text{MnO})$

图9 成因类型判别图解

Fig. 9 Discrimination Diagrams of Genetic Types

#### 5.1.2 岩浆源区特征

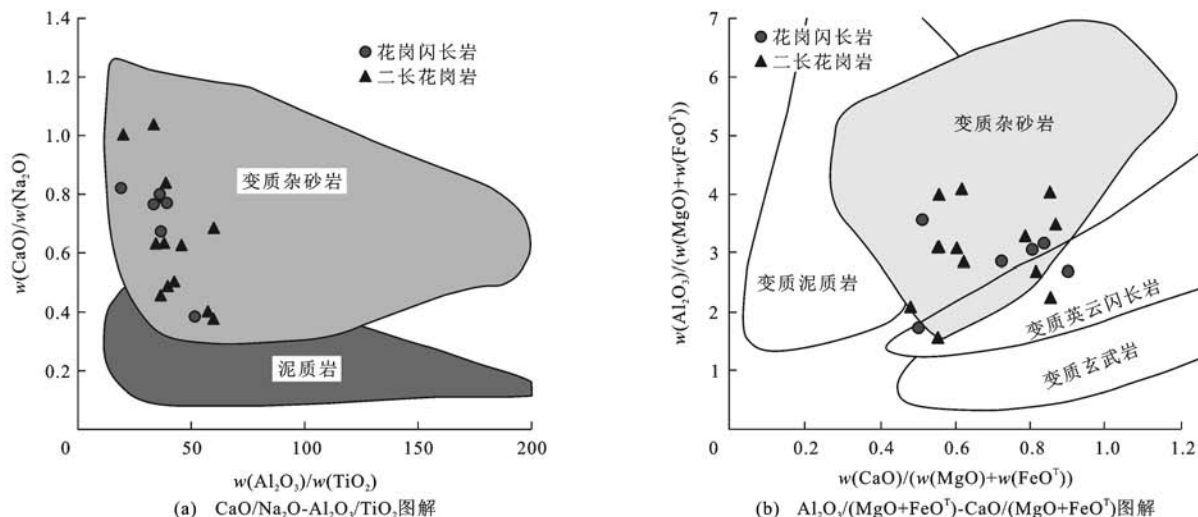
柯柯沙花岗闪长岩和二长花岗岩  $w(\text{Nb})/w(\text{Ta})$  值分别为 3.53~14.60 和 7.65~20.50, 远低于地幔平均值(60), 而更接近于地壳平均值(11~13)<sup>[56]</sup>,  $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$  值分别为 26.9~37.1 和 23.4~37.6, 接近于壳源岩石  $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$  值(33)<sup>[57]</sup>, 上述特征表明岩石源岩主要为地壳物质<sup>[58]</sup>。柯柯沙花岗闪长岩和二长花岗岩的锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值分别为 -2.7~2.9 和 -6.7~3.4, 二阶段模式年龄分别为 1.57~1.93 Ga 和 1.52~2.16 Ga, 进一步反映其源岩主要为古—中元古代地壳物质。

S型花岗岩的  $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$  值可用作判别其源区成分的重要指标, 由泥质岩部分熔融生成的花岗岩  $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$  值较低, 一般小于 0.30, 而由富长石、贫黏土的砂质岩部分熔融生成的花岗岩  $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$  值一般大于 0.30<sup>[59]</sup>。柯柯沙花岗闪长岩和二长花岗岩的  $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$  值分别为 0.38~0.82 和 0.37~1.03, 均大于 0.30, 在  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  图解中大部分样品投点落在变质杂砂岩区, 少部分落在变质杂砂岩与泥质岩的重叠区[图10(a)]。而在  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO}+\text{FeO}^{\text{T}})-\text{CaO}/(\text{MgO}+\text{FeO}^{\text{T}})$  图解中, 大部分样品落入变质杂砂岩区, 少量样品落在变质英云闪长岩或与变质杂砂岩的重叠区内[图10(b)]。综上所述, 柯柯沙

花岗岩的岩浆源岩可能主要以变质杂砂岩为主, 少量为变质泥质岩和变质英云闪长岩。

花岗岩的成分特征不仅与其源区岩石成分密切相关, 同时还与源区部分熔融温压条件和熔融机制有关。由角闪石脱水熔融形成的熔体通常富 Na、Ca 且具有较低的  $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$  值, 而云母类矿物脱水形成的熔体则富含 Rb、Cs 并具有较高的  $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$  值<sup>[60]</sup>, 其中由白云母脱水熔融产生的熔体具有较低的 Fe、Mg、Ti 含量和较高的  $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$  值, 而黑云母脱水熔融产生的熔体则具有较高的 Fe、Mg、Ti 含量,  $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$  值普遍较低<sup>[61-63]</sup>。柯柯沙花岗闪长岩和二长花岗岩富含 Rb、Cs 等碱金属元素, 指示可能由云母类矿物而不是角闪石脱水熔融而成; 它们具有较高的  $w(\text{Fe}_2\text{O}_3) + w(\text{MgO}) + w(\text{TiO}_2)$  值和  $w(\text{K}_2\text{O}) + w(\text{Na}_2\text{O})$  值以及低的  $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$  值, 指示其岩浆可能是由变质杂砂岩经黑云母脱水熔融形成的。

锆石是花岗质岩类中较早从岩浆中结晶且普遍存在的副矿物, 锆石的饱和温度可以代表锆石结晶温度的上限, 进而锆石饱和温度可近似代表初始岩浆形成温度<sup>[64-65]</sup>。Watson 等通过高温研究了锆石的饱和行为, 在此基础上提出了锆石溶解度模型, 并推导出锆石饱和温度为  $t_{\text{Zr}} = 12\,900 / (\ln D_{\text{Zr}} + 0.85M + 2.95) - 273$ <sup>[64]</sup>。若假设不做锆石矿物的



图(a)引自文献[66];图(b)引自文献[67]

图 10 物源判别图解

Fig. 10 Discrimination Diagrams of Sources

Zr、Hf 校正,纯锆石中 Zr 含量为  $496\ 000 \times 10^{-6}$ ,利用本文所测样品中全岩 Zr 含量近似代表熔体 Zr 含量,计算出柯柯沙花岗闪长岩和二长花岗岩的锆石饱和温度分别为  $757\ ^\circ\text{C} \sim 841\ ^\circ\text{C}$  (平均值为  $789\ ^\circ\text{C}$ ) 和  $731\ ^\circ\text{C} \sim 837\ ^\circ\text{C}$  (平均值为  $788\ ^\circ\text{C}$ ) (表 2),表明岩浆形成温度为  $800\ ^\circ\text{C}$  左右。所有样品显示高 Y 含量 ( $(26.0 \sim 72.0) \times 10^{-6}$ )、低 Sr 含量 ( $(72 \sim 224) \times 10^{-6}$ ), 19 件样品中除 3 件  $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$  值为  $9.24 \sim 15.20$  外,其余均低于 7,绝大部分岩石  $w(\text{Y})/w(\text{Yb})$  平均值为 9.7,普遍低于 10 (表 2),表明岩石源区没有石榴石残留,局部存在残留角闪石,斜长石仍为稳定矿物<sup>[68-69]</sup>且未大量进入到岩浆中。岩石薄片观察发现岩石中普遍含有石榴石,这些石榴石均不发育长英质矿物包裹体,可能为黑云母脱水熔融的转熔产物,形成之后进入到熔浆中。Vielzeuf 等通过比较变质泥质岩和变质杂砂岩脱水熔融实验,发现在温度处于  $700\ ^\circ\text{C} \sim 800\ ^\circ\text{C}$  时,石榴石稳定线在  $0.9 \sim 1.4\ \text{GPa}$  内变化<sup>[70]</sup>。综上所述,柯柯沙花岗闪长岩和二长花岗岩岩浆产生的温度条件约为  $800\ ^\circ\text{C}$ ,压力条件在  $0.9 \sim 1.4\ \text{GPa}$  之间。

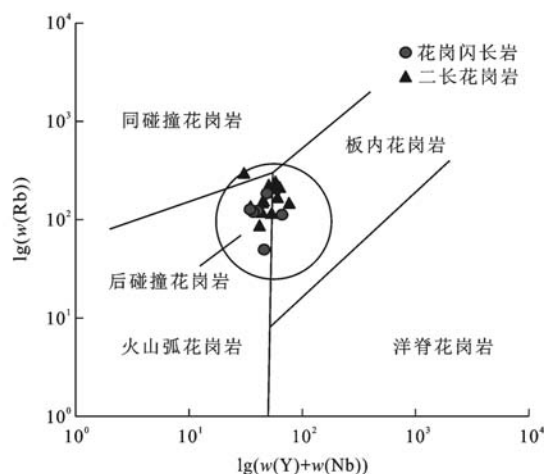
## 5.2 构造环境及意义

Zhu 等将两个远离板块的汇聚碰撞过程划分为 3 个阶段,并系统阐述了对应于各阶段的岩浆作用特征<sup>[71]</sup>。第一阶段为洋壳俯冲阶段,由俯冲洋壳板块所致的流体交代地幔楔部分熔融形成简单的钙碱性 I 型花岗岩岩浆;第二阶段为洋壳消失的两个大陆块的初始碰撞(即同碰撞)阶段,导致中—上地壳的剪切产生少量的强过铝质花岗岩岩浆;第三阶段

为俯冲板片断裂后的后碰撞阶段,形成包括高钾钙碱性花岗岩、 $A_2$  型花岗岩、埃达克质岩和玄武岩等在内的多样花岗岩类型。柯柯沙花岗闪长岩和二长花岗岩属于高钾钙碱性的 S 型花岗岩,总体上具有高 Si,富碱,贫 Mg、Fe,富集大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Sr、P、Ti 等元素的地球化学特征,这些特征与后碰撞阶段形成的高钾钙碱性花岗岩(KCG)特征一致<sup>[67,72-73]</sup>。结合区域新元古代花岗岩岩浆演化,柯柯沙花岗闪长岩和二长花岗岩的形成时间稍晚于祁连造山带内的新元古代俯冲-碰撞阶段的岩浆作用<sup>[12-19]</sup>,可能为后碰撞阶段的岩浆作用。在 Rb-Y+Nb 图解中,柯柯沙花岗闪长岩和二长花岗岩样品落入火山弧花岗岩、板内花岗岩和同碰撞花岗岩复合区域(图 11),显示出与源区组分复杂多样的后碰撞花岗岩<sup>[74]</sup>类似的地球化学属性。

越来越多的研究资料揭示,中国西部陆块保留了大量响应 Rodinia 超大陆聚合的花岗岩岩浆作用证据。阿尔金造山带  $880 \sim 940\ \text{Ma}$  的同碰撞花岗岩<sup>[75-77]</sup>、东昆仑造山带  $870 \sim 875\ \text{Ma}$  的同碰撞花岗岩<sup>[78]</sup>、柴达木地块北缘  $850 \sim 1\ 000\ \text{Ma}$  的大型同碰撞花岗岩带<sup>[79-80]</sup>和  $850 \sim 938\ \text{Ma}$  的碰撞变质作用<sup>[81-84]</sup>等一致的年龄范围共同表明在新元古代早期曾发生过古大陆块体的碰撞汇聚。祁连造山带最早的弧花岗岩岩浆作用发生在约  $1\ 100\ \text{Ma}$ <sup>[20]</sup>,且持续到  $880 \sim 940\ \text{Ma}$ <sup>[18]</sup>。本文研究的柯柯沙花岗岩体发育在南祁连造山带南缘的乌北地体中,是一个多次侵入的复式花岗岩体,较早侵入的花岗闪长岩发生在约  $860\ \text{Ma}$ ,稍晚侵入的二长花岗岩发生在  $810 \sim 830$





图件引自文献[74]

图 11 Rb-Y+Nb 图解

Fig. 11 Diagram of Rb-Y+Nb

Ma。花岗闪长岩和二长花岗岩均属于过铝质高钾钙碱性 S 型花岗岩,形成于后碰撞阶段的伸展构造环境。这表明在 860 Ma 之前,中国西北部局部地区的碰撞阶段已经结束,进入到后碰撞伸展阶段。

## 6 结 语

(1)区域变质前的南祁连造山带南缘柯柯沙岩体为一复式花岗岩体,主要由约 860 Ma 的花岗闪长岩和 810~830 Ma 的二长花岗岩岩浆相继侵入结晶而成。该岩体在早古生代(约 460 Ma)受强烈的变质变形作用改造。

(2)柯柯沙花岗闪长岩和二长花岗岩均属于 S 型花岗岩,由变质杂砂岩在约 800 °C 和 0.9~1.4 GPa 的温压条件下经黑云母脱水熔融形成。

(3)柯柯沙花岗闪长岩和二长花岗岩岩浆产生和侵位发生在后碰撞阶段,乌北地体碰撞造山阶段结束于 860 Ma 之前。

## 参考文献:

### References:

- [1] MOORES E M. Southwest U. S. -East Antarctic (SWEAT) Connection: A Hypothesis[J]. *Geology*, 1991, 19(5): 425-428.
- [2] HOFFMAN P F. Did the Breakout of Laurentia Turn Gondwanaland Inside-out? [J]. *Science*, 1991, 252: 1409-1412.
- [3] CONDIE K C. Continental Growth During Formation of Rodinia at 1.35-0.90 Ga[J]. *Gondwana Research*, 2001, 4(1): 5-16.
- [4] LI Z X, BOGDANOVA S V, COLLINS A S, et al. Assembly, Configuration, and Break-up History of Rodi-

nia: A Synthesis[J]. *Precambrian Research*, 2008, 160 (1/2): 179-210.

- [5] 张传林,李怀坤,王洪燕.塔里木地块前寒武纪地质研究进展评述[J]. *地质论评*, 2012, 58(5): 923-936.  
ZHANG Chuan-lin, LI Huai-kun, WANG Hong-yan. A Review on Precambrian Tectonic Evolution of Tarim Block: Possibility of Interaction Between Neoproterozoic Plate Subduction and Mantle Plume[J]. *Geological Review*, 2012, 58(5): 923-936.
- [6] ZHANG C L, ZOU H B, LI H K, et al. Tectonic Framework and Evolution of the Tarim Block in NW China[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23 (4): 1306-1315.
- [7] WANG C, LIU L, YANG W Q, et al. Provenance and Ages of the Altyn Complex in Altyn Tagh: Implications for the Early Neoproterozoic Evolution of Northwestern China[J]. *Precambrian Research*, 2013, 230: 193-208.
- [8] YU S Y, ZHANG J X, REAL P G D, et al. The Grenvillian Orogeny in the Altun-Qilian-North Qaidam Mountain Belts of Northern Tibet Plateau: Constraints from Geochemical and Zircon U-Pb Age and Hf Isotopic Study of Magmatic Rocks[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 73: 372-395.
- [9] WANG X X, WANG T, ZHANG C L. Neoproterozoic, Paleozoic, and Mesozoic Granitoid Magmatism in the Qinling Orogen, China: Constraints on Orogenic Process[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 72: 129-151.
- [10] 李献华,李武显,何斌.华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合-裂解[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2012, 31(6): 543-559.  
LI Xian-hua, LI Wu-xian, HE Bin. Building of the South China Block and Its Relevance to Assembly and Breakup of Rodinia Supercontinent [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2012, 31 (6): 543-559.
- [11] 杨经绥,许志琴,马昌前,等.复合造山作用和中国中央造山带的科学问题[J]. *中国地质*, 2010, 37(1): 1-11.  
YANG Jing-sui, XU Zhi-qin, MA Chang-qian, et al. Compound Orogeny and Scientific Problems Concerning the Central Orogenic Belt of China[J]. *Geology in China*, 2010, 37(1): 1-11.
- [12] 郭进京,赵凤清,李怀坤.中祁连东段晋宁期碰撞型花岗岩及其地质意义[J]. *地球学报*, 1999, 20(1): 10-15.  
GUO Jin-jing, ZHAO Feng-qing, LI Huai-kun. Jinningian Collisional Granite Belt in the Eastern Sector of the Central Qilian Massif and Its Implication[J].

- Acta Geoscientia Sinica, 1999, 20(1): 10-15.
- [13] 梅华林, 李惠民, 陆松年, 等. 甘肃柳园地区花岗质岩石时代及成因[J]. 岩石矿物学杂志, 1999, 18(1): 14-17.  
MEI Hua-lin, LI Hui-min, LU Song-nian, et al. The Age and Origin of the Liuyuan Granitoid, Northwestern Gansu[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1999, 18(1): 14-17.
- [14] 于海峰, 陆松年, 修群业, 等. 甘肃北山西部新元古代陆块汇聚与裂解事件的岩石记录[J]. 前寒武纪研究进展, 2000, 23(2): 98-102.  
YU Hai-feng, LU Song-nian, XIU Qun-ye, et al. Assembly and Crack Events of Neoproterozoic Continental Blocks in Western Beishan Mountain, Gansu Province, China [J]. Progress in Precambrian Research, 2000, 23(2): 98-102.
- [15] GEHRELS G E, YIN A, WANG X F. Magmatic History of the Northeastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108 (B9): ETG 5-1-ETG 5-14.
- [16] 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): 1572-1585.  
DONG Guo-an, YANG Huai-ren, YANG Hong-yi, et al. SHRIMP U-Pb Geochronology of the Zircons from the Precambrian Basement of the Qilian Block and Its Geological Significances[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(13): 1572-1585.
- [17] 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 Wen-jiao, YUAN Chao, et al. LA-ICPMS Zircon U-Pb Ages of Granitic Plutons from the Eastern Sector of the Central Qilian and Their Geologic Implication[J]. Xinjiang Geology, 2008, 26(1): 62-70.
- [18] TUNG K A, YANG H Y, LIU D Y, et al. The Neoproterozoic Granitoids from the Qilian Block, NW China: Evidence for a Link Between the Qilian and South China Blocks[J]. Precambrian Research, 2013, 235: 163-189.
- [19] 李 猛, 王 超, 李荣社, 等. 祁连山西段新元古代晚期花岗质片麻岩成因及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年[J]. 地质通报, 2015, 34(8): 1438-1446.  
LI Meng, WANG Chao, LI Rong-she, et al. Petrogenesis and LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Late Neoproterozoic Granitic Gneisses in Western Qilian Mountain[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(8): 1438-1446.
- [20] 王 珩. 青海省乌北地体 Grenville 期花岗质岩浆作用的年代学和地球化学研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.  
WANG Heng. The Grenville Granitic Magmatism in North-Wulan Terrane, Qinghai Province: Evidence from Geochronology and Geochemistry[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016.
- [21] 青海省地质矿产局. 青海省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991.  
Bureau of Geological and Mineral Resources of Qinghai Province. Regional Geology of Qinghai Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.
- [22] 李秀财, 牛漫兰, 闫 臻, 等. 柴北缘乌兰县二郎洞达肯大坂岩群中混合岩化黑云斜长片麻岩锆石 SHRIMP 测年及其意义[J]. 地质科学, 2015, 50(3): 728-740.  
LI Xiu-cai, NIU Man-lan, YAN Zhen, et al. SHRIMP Zircon Dating for Migmatitic Biotite Plagioclase Gneiss from Erlangdong Dakendaban Group in Wulan at the Northern Margin of Qaidam Basin and Its Geological Significance[J]. Chinese Journal of Geology, 2015, 50(3): 728-740.
- [23] 李秀财, 牛漫兰, 闫 臻, 等. 青海省乌兰县早古生代低压高温变质岩: 柴北缘存在双变质带? [J]. 科学通报, 2015, 60(35): 3501-3513.  
LI Xiu-cai, NIU Man-lan, YAN Zhen, et al. LP/HT Metamorphic Rocks in Wulan County, Qinghai Province: An Early Paleozoic Paired Metamorphic Belt on the Northern Qaidam Basin? [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(35): 3501-3513.
- [24] WANG L, WANG H, HE C, et al. Mesoproterozoic Continental Breakup in NW China: Evidence from Gray Gneisses from the North Wulan Terrane[J]. Precambrian Research, 2016, 281: 521-536.
- [25] CHEN N S, LIAO F X, WANG L, et al. Late Paleoproterozoic Multiple Metamorphic Events in the Quanji Massif: Links with Tarim and North China Cratons and Implications for Assembly of the Columbia Supercontinent[J]. Precambrian Research, 2013, 228: 102-116.
- [26] LIU Y S, HU Z C, GAO S, et al. In-situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS Without Applying an Internal Standard [J]. Chemical Geology, 2008, 257(1/2): 34-43.
- [27] LIU Y S, GAO S, HU Z C, et al. Continental and Oceanic Crust Recycling-induced Melt-peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from

- Mantle Xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1/2):537-571.
- [28] HU Z C, LIU Y S, GAO S, et al. Improved In-situ Hf Isotope Ratio Analysis of Zircon Using Newly Designed X Skimmer Cone and Jet Sample Cone in Combination with the Addition of Nitrogen by Laser Ablation Multiple Collector ICP-MS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2012, 27(9):1391-1399.
- [29] MA Q, ZHENG J P, GRIFFIN W L, et al. Triassic "Adakitic" Rocks in an Extensional Setting (North China): Melts from the Cratonic Lower Crust[J]. *Lithos*, 2012, 149:159-173.
- [30] HANCHAR J M, MILLER C F. Zircon Zonation Patterns as Revealed by Cathodoluminescence and Back-scattered Electron Images: Implications for Interpretation of Complex Crustal Histories[J]. *Chemical Geology*, 1993, 110(1/2/3):1-13.
- [31] CORFU F, HANCHAR J M, HOSKIN P W O, et al. Atlas of Zircon Textures[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1):469-500.
- [32] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 2004, 49(16):1589-1604.
- WU Yuan-bao, ZHENG Yong-fei. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(16):1589-1604.
- [33] HEAMAN L M, BOWINS R, CROCKET J. The Chemical Composition of Igneous Zircon Suites: Implications for Geochemical Tracer Studies[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(6):1597-1607.
- [34] BELOUSOVA E, GRIFFIN W, O'REILLY S Y, et al. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143(5):602-622.
- [35] 邱家骧, 林景仟. 岩石化学[M]. 北京:地质出版社, 1991.
- QIU Jia-xiang, LIN Jing-qian. *Lithochemistry* [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1991.
- [36] DE LA ROCHE H, LETERRIER J, GRANDCLAUDE P, et al. A Classification of Volcanic and Plutonic Rocks Using  $R_1$ - $R_2$  Diagram and Major-element Analyses: Its Relationships with Current Nomenclature [J]. *Chemical Geology*, 1980, 29(1/2/3/4):183-210.
- [37] MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic Discrimination of Granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5):635-643.
- [38] RICKWOOD P C. Boundary Lines Within Petrologic Diagrams Which Use Oxides of Major and Minor Elements[J]. *Lithos*, 1989, 22(4):247-263.
- [39] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42:313-345.
- [40] BLICHERT-TOFT J, CHAUVEL C, ALBAREDE F. Separation of Hf and Lu for High-precision Isotope Analysis of Rock Samples by Magnetic Sector-multiple Collector ICP-MS[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1997, 127(3):248-260.
- [41] GRIFFIN W L, PEARSON N J, BELOUSOVA E, et al. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LAM-MC-ICPMS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(1):133-147.
- [42] GRIFFIN W L, WANG X, JACKSON S E, et al. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: In-situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes[J]. *Lithos*, 2002, 61(3/4):237-269.
- [43] VERVOORT J D, BLICHERT-TOFT J. Evolution of the Depleted Mantle: Hf Isotope Evidence from Juvenile Rocks Through Time[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(3/4):533-556.
- [44] AMELIN Y, LEE D C, HALLIDAY A N. Early-Middle Archaean Crustal Evolution Deduced from Lu-Hf and U-Pb Isotopic Studies of Single Zircon Grains[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(24):4205-4225.
- [45] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2):185-220.
- WU Fu-yuan, LI Xian-hua, ZHENG Yong-fei, et al. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2):185-220.
- [46] MILLER C F. Are Strongly Peraluminous Magmas Derived from Pelitic Sedimentary Sources? [J]. *The Journal of Geology*, 1985, 93(6):673-689.
- [47] WHITE A J R, CLEMENS J D, HOLLOWAY J R, et al. S-type Granites and Their Probable Absence in Southwestern North America[J]. *Geology*, 1986, 14(2):115-118.
- [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] 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 Fu-yuan, LI Xian-hua, YANG Jin-hui, et al. Dis-



- cussions on the Petrogenesis of Granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6): 1217-1238.
- [50] HARRISON T M, WATSON E B. The Behavior of Apatite During Crustal Anatexis: Equilibrium and Kinetic Considerations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(7): 1467-1477.
- [51] LONDON D. Phosphorus in S-type Magmas: The  $P_2O_5$  Content of Feldspars from Peraluminous Granites, Pegmatites, and Rhyolites[J]. *American Mineralogist*, 1992, 77(1/2): 126-145.
- [52] WOLF M B, LONDON D. Apatite Dissolution into Peraluminous Haplogranitic Melts: An Experimental Study of Solubilities and Mechanisms[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(19): 4127-4145.
- [53] SHA L K, CHAPPELL B W. Apatite Chemical Composition by Electron Microprobe and Laser-ablation Inductively Coupled Plasma Spectrometry, as a Probe into Granite Petrogenesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(22): 3861-3881.
- [54] BELOUSOVA E A, WALTERS S, GRIFFIN W L, et al. Trace-element Signatures of Apatites in Granitoids from the Mt Isa Inlier, Northwestern Queensland[J]. *Australia Journal of Earth Sciences*, 2001, 48(4): 603-619.
- [55] CHU M F, WANG K L, GRIFFIN W L, et al. Apatite Composition: Tracing Petrogenetic Processes in Transhimalayan Granitoids[J]. *Journal of Petrology*, 2009, 50(10): 1829-1855.
- [56] BARTH M G, MCDONOUGH W F, RUDNICK R L. Tracking the Budget of Nb and Ta in the Continental Crust[J]. *Chemical Geology*, 2000, 165(3/4): 197-213.
- [57] GREEN T H. Significance of Nb/Ta as an Indicator of Geochemical Processes in the Crust-mantle System[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3/4): 347-359.
- [58] RUDNICK R L, FOUTAIN D M. Nature and Composition of the Continental Crust: A Lower Crustal Perspective[J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(3): 267-309.
- [59] SYLVESTER P J. Post-collisional Strongly Peraluminous Granites[J]. *Lithos*, 1998, 45(1/2/3/4): 29-44.
- [60] 赵永久, 袁超, 周美夫, 等. 川西老君沟和孟通沟花岗岩的地球化学特征、成因机制及对松潘—甘孜地体基底性质的制约[J]. *岩石学报*, 2007, 23(5): 995-1006.
- ZHAO Yong-jiu, YUAN Chao, ZHOU Mei-fu, et al. Geochemistry and Petrogenesis of Laojungou and Mengtonggou Granites in Western Sichuan, China: Constraints on the Nature of Songpan-Ganzi Basement[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(5): 995-1006.
- [61] INGER S, HARRIS N. Geochemical Constraints on Leucogranite Magmatism in the Langtang Valley, Nepal Himalaya[J]. *Journal of Petrology*, 1993, 34(2): 345-368.
- [62] HARRISON T M, GROVE M, MCKEEGAN K D, et al. Origin and Episodic Emplacement of the Manaslu Intrusive Complex, Central Himalaya[J]. *Journal of Petrology*, 1999, 40(1): 3-19.
- [63] VISONA D, LOMBARDO B. Two-mica and Tourmaline Leucogranites from the Everest-Makalu Region (Nepal-Tibet). Himalayan Leucogranite Genesis by Isobaric Heating? [J]. *Lithos*, 2002, 62(3/4): 125-150.
- [64] WATSON E B, HARRISON T M. Zircon Saturation Revisited: Temperature and Composition Effects in a Variety of Crustal Magma Types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 64(2): 295-304.
- [65] MILLER C F, MESCHTER M S, MAPES R W. Hot and Cold Granites? Implications of Zircon Saturation Temperatures and Preservation of Inheritance[J]. *Geology*, 2003, 31(6): 529-532.
- [66] JUNG S, PFANDER J A. Source Composition and Melting Temperatures of Orogenic Granitoids: Constraints from  $CaO/Na_2O$ ,  $Al_2O_3/TiO_2$  and Accessory Mineral Saturation Thermometry[J]. *European Journal of Mineralogy*, 2007, 19(6): 859-870.
- [67] GERDES A, WORNER G, HENK A. Post-collisional Granite Generation and HT-LP Metamorphism by Radiogenic Heating: The Variscan South Bohemian Batholith[J]. *Journal of the Geological Society*, 2000, 157(3): 577-587.
- [68] XIONG X L, ADAM J, GREEN T H. Rutile Stability and Rutile/Melt HFSE Partitioning During Partial Melting of Hydrous Basalt: Implications for TTG Genesis[J]. *Chemical Geology*, 2005, 218(3/4): 339-359.
- [69] CASTILLO P R. An Overview of Adakite Petrogenesis[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(3): 257-268.
- [70] VIELZEUF D, SCHMIDT M W. Melting Relations in Hydrous Systems Revisited: Application to Metapelites, Metagreywackes and Metabasalts [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2001, 141(3): 251-267.
- [71] ZHU D C, WANG Q, ZHAO Z D, et al. Magmatic Record of India-Asia Collision[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14289.
- [72] LIEGEOIS J P, NAVEZ J, HERTOGEN J, et al. Contrasting Origin of Post-collisional High-K Calc-alka-

- line and Shoshonitic Versus Alkaline and Peralkaline Granitoids: The Use of Sliding Normalization[J]. *Lithos*, 1998, 45(1/2/3/4): 1-28.
- [73] 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): 295-318.
- [74] PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.
- [75] 王超, 刘良, 车自成, 等. 阿尔金南缘榴辉岩带中花岗片麻岩的时代及构造环境探讨[J]. *高校地质学报*, 2006, 12(1): 74-82.
- WANG Chao, LIU Liang, CHE Zi-cheng, et al. U-Pb Geochronology and Tectonic Setting of the Granitic Gneiss in Jianggaleisayi Eclogite Belt, the Southern Edge of Altyn Tagh[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2006, 12(1): 74-82.
- [76] 王超. 塔里木盆地南缘前寒武纪地质演化[D]. 西安: 西北大学, 2011.
- WANG Chao. Precambrian Tectonic of South Margin of Train Basin, NW China[D]. Xi'an: Northwest University, 2011.
- [77] 孟繁聪, 崔美慧, 吴祥珂, 等. 东昆仑祁漫塔格花岗片麻岩记录的岩浆和变质事件[J]. *岩石学报*, 2013, 29(6): 2107-2122.
- MENG Fan-cong, CUI Mei-hui, WU Xiang-ke, et al. Magmatic and Metamorphic Events Recorded in Granitic Gneisses from the Qimantag, East Kunlun Mountains, Northwest China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(6): 2107-2122.
- [78] 陈有炘, 裴先治, 李佐臣, 等. 东昆仑东段巴隆花岗片麻岩年代学、地球化学特征及地质意义[J]. *岩石学报*, 2015, 31(8): 2230-2244.
- CHEN You-xin, PEI Xian-zhi, LI Zuo-chen, et al. Geochronology, Geochemical Features and Geological Significance of the Granitic Gneiss in Balong Area, East Section of East Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(8): 2230-2244.
- [79] 许娅玲, 巴金, 王勤燕, 等. 青海都兰东北部哈莉哈德山花岗片麻岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及构造意义[J]. *地质通报*, 2011, 30(7): 1037-1042.
- XU Ya-ling, BA Jin, WANG Qin-yan, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age of the Halihadeshan Granite-gneiss in Northeastern Dulan, Qinghai, and Its Tectonic Implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(7): 1037-1042.
- [80] 辛后田, 王惠初, 周世军. 柴北缘的大地构造演化及其地质事件群[J]. *地质调查与研究*, 2006, 29(4): 311-320.
- XIN Hou-tian, WANG Hui-chu, ZHOU Shi-jun. Geological Events and Tectonic Evolution of the North Margin of the Qaidam Basin[J]. *Geological Survey and Research*, 2006, 29(4): 311-320.
- [81] 张聪, 刘晓瑜, 杨经绥, 等. 柴北缘超高压变质带的新元古代变质作用: 来自锡铁山副片麻岩的岩石学及独居石年代学证据[J]. *岩石学报*, 2016, 32(12): 3715-3728.
- ZHANG Cong, LIU Xiao-yu, YANG Jing-sui, et al. The Neoproterozoic Metamorphism of North Qaidam UHPM Belt, Western China: Constrain from Petrological Study and Monazite Dating of Paragneiss[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(12): 3715-3728.
- [82] ZHANG J X, CHRISTOPHER G M, MENG F. Polyphase Tectonothermal History Recorded in Granulitized Gneisses from the North Qaidam HP/UHP Metamorphic Terrane, Western China: Evidence from Zircon U-Pb Geochronology[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2008, 120(5/6): 732-749.
- [83] SONG S G, SU L, LI X H, et al. Grenville-age Orogenesis in the Qaidam-Qilian Block: The Link Between South China and Tarim[J]. *Precambrian Research*, 2012, 220/221: 9-22.
- [84] ZHANG C, ROERMUND H V, ZHANG L F, et al. A Polyphase Metamorphic Evolution for the Xitieshan Paragneiss of the North Qaidam UHP Metamorphic Belt, Western China: In-situ EMP Monazite and U-Pb Zircon SHRIMP Dating[J]. *Lithos*, 2012, 136/137/138/139: 27-45.