

黄增保, 郑建平, 李葆华, 等. 中祁连西段野马山岩基年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(2): 406–420.
Huang Zengbao, Zheng Jianping, Li Baohua, et al. Geochronology and geochemistry of Yemashan batholiths in western Central Qilian and its tectonic implications[J]. Geology in China, 2015, 42(2): 406–420(in Chinese with English abstract).

中祁连西段野马山岩基年代学、地球化学特征 及地质意义

黄增保^{1,2} 郑建平¹ 李葆华³ 魏志军² 漆 玮² 陈 旭²

(1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 7310010;
3. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要: 野马山岩基位于中祁连地块西段, 由早期岩体(花岗闪长岩、斑状二长花岗岩)和晚期岩体(二长花岗岩)组成, 二者呈侵入接触。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年表明, 早期岩体侵位时代为中奥陶世((469.0±1.3) Ma), 晚期岩体侵位时代为晚奥陶世((450.0±1.0) Ma)。早期岩体 SiO₂=59.8%~64.2%, K₂O/Na₂O>1, 且 A/NKC=0.8~1.0, 为准铝质岩石; 微量元素相对富集 Rb、U、Th 和亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、P、Ti; 稀土总量为 97.7×10⁻⁶~185×10⁻⁶, 且(La/Yb)_N=5.57~12.47, LREE/HREE=7.7~11.3, 具轻重稀土分馏明显, 轻稀土富集, 弱 Eu 负异常(δEu=0.66~0.89)特征。晚期岩体 SiO₂=69.8%~76.5%, K₂O/Na₂O=1.2~1.7, A/NKC=1.0~1.1, 属弱过铝质花岗岩; 稀土总量为 78.97×10⁻⁶~244.92×10⁻⁶, 轻重稀土分馏不明显((La/Yb)_N=1.90~5.72), 强 Eu 负异常(δEu=0.11~0.24)。岩石地球化学特征表明, 野马山岩基早期岩体为 I 型花岗岩, 形成于俯冲环境, 晚期岩体为高分异的 I 型花岗岩, 形成于后碰撞环境。结合岩体产出的区域构造位置及区域地质演化, 认为早古生代北祁连洋发生了双向俯冲, 野马山岩基为其向南俯冲碰撞的产物。

关键词: 中祁连; LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年; 双向俯冲; 野马山岩基

中图分类号: P581; P597; P547 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)02-0406-15

Geochronology and geochemistry of Yemashan batholiths in western Central Qilian and its tectonic implications

HUANG Zeng-bao^{1,2}, ZHENG Jian-ping¹, LI Bao-hua³, WEI Zhi-jun², QI Wei², CHEN Xu²

(1. Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Geological Survey of Gansu Province, Lanzhou 735000, China; 3. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: Located in western Central Qilian Mountain, the Yemashan batholiths are composed of early pluton (granodiorite and porphyritic monzogranite) and late pluton (monzogranite). U-Pb age determination of zircon by LA-ICPMS shows that the early pluton of Yemashan batholiths was intruded at (469.0±1.3) Ma, and the late pluton was intruded at (450.0±1.0) Ma. Compositionally,

收稿日期: 2014-05-25; 改回日期: 2014-09-20

基金项目: 中国地质调查局地调项目(1212010781070)和国家自然科学基金项目(41372094)联合资助。

作者简介: 黄增保, 男, 1978 年生, 博士生, 岩石学专业; E-mail: gsddyhzb@126.com。

the early pluton of Yemashan batholiths has SiO_2 values ranging from 59.8% to 64.2%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratios higher than 1, and molar A/NKC ratios from 0.8 to 1.0, indicating typical metaluminous granitoid. The pluton is depleted in Ba, Nb, Ta, Sr, P and Ti, and enriched in Rb, U and Th, and has total REE content ranging from 97.73×10^{-6} to 185.76×10^{-6} , $(\text{La}/\text{Yb})_N$ from 5.57 to 12.47, and LREE/HREE from 7.7 to 11.3. The chondrite-normalized REE patterns of the pluton exhibit enrichment of LREE and depletion of HREE, with moderate negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu}=0.66-0.89$). The late pluton of Yemashan batholiths has SiO_2 ranging from 69.8% to 76.5%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ from 1.2 to 1.7, and molar A/NKC from 0.8 to 1.0, implying weakly peraluminous granitoid. It also shows enrichment of Rb, U and Th, and depletion of Ba, Nb, Ta, Sr, P and Ti, with ΣREE from 78.97×10^{-6} to 244.92×10^{-6} , and $(\text{La}/\text{Yb})_N$ from 5.57 to 12.47. The chondrite-normalized REE patterns of the pluton exhibit enrichment of LREE and depletion of HREE, with pronounced negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu}=0.11-0.24$). The petrological and geochemical characteristics indicate that the early pluton of Yemashan batholiths could represent typical I-type granite formed in a subduction orogenic setting. The late pluton should be assigned to highly fractionated I-type granite formed in a post-collisional orogenic setting. On the basis of these features in combination with the tectonic locations of granite occurrence and field observation data, the authors hold that southward and northward subductions of the North Qilian oceanic plate took place in the Early Paleozoic, during which the southward subduction and collision resulted in the formation of Yemashan batholiths.

Key words: Central Qilian; LA-ICPMS zircon U-Pb dating; double subduction; Yemashan batholiths

About the first author: HUANG Zeng-bao, male, born in 1978, doctor candidate, majors in the study of petrology; E-mail: gsddyhzb@126.com.

祁连造山带夹持于阿拉善地块和柴达木地块之间,是典型的加里东期增生造山带,由北往南依次为北祁连造山带、中祁连地块和南祁连裂谷3个构造单元(图1-a)。北祁连造山带发育较为典型的蛇绿岩、俯冲增生杂岩、岛弧火山岩系和丰富的矿床,备受地质学家的关注^[1-9]。目前对该造山带的构造演化,尤其是北祁连的俯冲方向还存有争议,有学者认为向北俯冲^[3,5,8],有部分学者则认为向南俯冲^[6],也有人提出向两侧双向俯冲的模式^[4,10-11]。造成这种分歧最根本原因是中对祁连地块,以及北祁连造山带南缘早古生代侵入岩研究不足。

野马山一带位于中祁连地块西段(图1-b),是中祁连地块早古生代侵入岩分布的集中区域。出露的侵入岩岩石类型齐全,成因多样,且有多期次多阶段侵入的特征。这些岩体形成时代和成因对探讨中祁连早古生代构造演化有重要的意义。关于该区侵入岩形成时代,有人采用锆石ID-TIMS等方法进行过定年^[12-15],但总体测年数据少,精度较低,其成因讨论还非常薄弱。

本文在详细野外调查的基础上,选择出露面积较大、较典型的野马山岩基,进行地质、岩石学、地球化学和LA-ICPMS锆石U-Pb年代学方面的研究,以期揭示中祁连西段早古生代花岗岩的年龄、岩石成因,并为区域构造演化历史研究提供约束。

1 区域地质

研究区位于甘肃省肃北县城SE 20 km,构造上属中祁连地块(图1-a)。中祁连为北祁连造山带和南祁连裂谷之间的一个前寒武纪变质地体^[6]。出露的地层有:下元古界北大河岩群,为一套高绿片岩相-低角闪岩相结晶基底岩系,岩性为片麻岩、石英片岩、斜长角闪片岩和大理岩等。中-新元古代地层依次为朱龙关群、花儿地组、龚岔群和白杨沟群。朱龙关群由变质基性火山岩、碎屑岩、碳酸盐及含铁岩系组成;花儿地组为厚层碳酸盐岩夹泥质板岩;龚岔群由碎屑岩与碳酸盐岩组成的浅变质沉积岩系;白杨沟群主要为厚层砾岩,局部见有中基性火山岩。此外,还发育少量晚古生代-新生代地层。

岩浆岩主要为加里东期中酸性侵入体,岩石类型复杂,有石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩等,呈复式岩基产出。岩体侵位年龄多数介于463~444 Ma^[12-13,15],为奥陶纪侵入岩,少数为435~415 Ma^[14],形成于志留纪。

2 岩体地质和岩相学

岩体出露于中祁连西段的平达坂、野马山,以及野马河一带(图2),呈椭圆状岩基产出,不对称同心环状展布,面积300 km²。南侧侵入于古元古代北

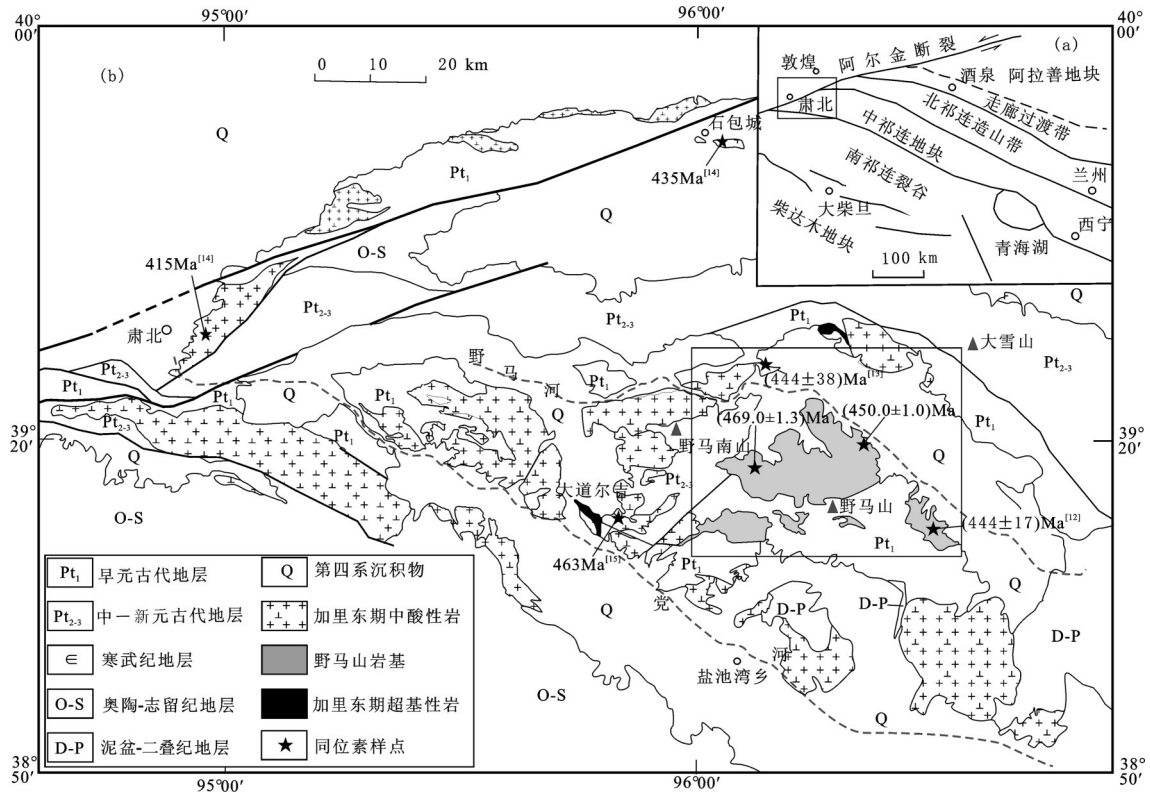


图1 祁连山西段区域地质简图

Fig.1 Simplified geological map of the west segment of the Qilian Mountain

大河岩群黑云母石英片岩、变粒岩、斜长角闪片岩和大理岩中,以及蕲县系花儿地组泥质板岩、变砂岩中。岩体内常见这些地层的捕虏体。

岩基具有多期多阶段岩浆活动的特点,根据接触关系、岩相特征,结合同位素年龄资料,将其划分为两期:早期岩体由花岗闪长岩和似斑状二长花岗岩组成;晚期岩体为二长花岗岩,二者呈超动侵入接触。

早期:主要出露于岩基西南的野马山、希里滚达坂、平达坂一带。构成野马山岩基的主体,占出露面积的2/3。侵入于早元古代北大河岩群和蕲县系花儿地组中,为晚期二长花岗岩侵入。由花岗闪长岩和斑状二长花岗岩组成,二者呈脉动侵入接触。

花岗闪长岩:由13个侵入体组成。呈灰白色,细粒花岗结构,块状构造,局部显弱片麻状构造。矿物组成:斜长石(40%~50%)、正长石(10%~15%)、石英(20%~25%)、角闪石(10%~15%),黑云母(1%~5%),副矿物为磁铁矿、磷灰石、榍石,含量均不足1%。斜长石为0.9~2.0 mm半自形宽板状晶体,偶

见卡钠复合双晶;石英为0.5~1.5 mm他形晶体,填充在斜长石空隙间,个别见波状消光现象;正长石:半自形晶,粒径1 mm左右,发育卡式双晶;角闪石为半自形短柱状;黑云母呈1 mm以下的片状晶体,见包裹磁铁矿、磷灰石等副矿物。

似斑状二长花岗岩:由1个侵入体组成。呈灰白色,似斑状结构,基质具细粒花岗结构,块状构造。斑晶为斜长石(10%±),粒径5~10 mm,个别达15 mm,自形-半自形板状晶体,正长石(5%±)为5~10 mm的他形-半自形晶体,发育卡式双晶。基质由斜长石(35%~40%)、正长石(10%~15%)、石英(20%~30%)、角闪石(5%~10%)、黑云母(1%~5%)等组成;磁铁矿、磷灰石等副矿物含量不足1%。基质矿物粒径在1~2 mm,斜长石呈板状自形晶体,见弱绢云母化,石英、正长石呈他形粒状晶体填充在斜长石空隙中。

晚期:由野马河、黑沟梁子两个侵入体组成。呈小岩株产出。因岩体中正长石较多,野外呈鲜艳红色。南侵入于早期似斑状二长花岗岩中,北为第

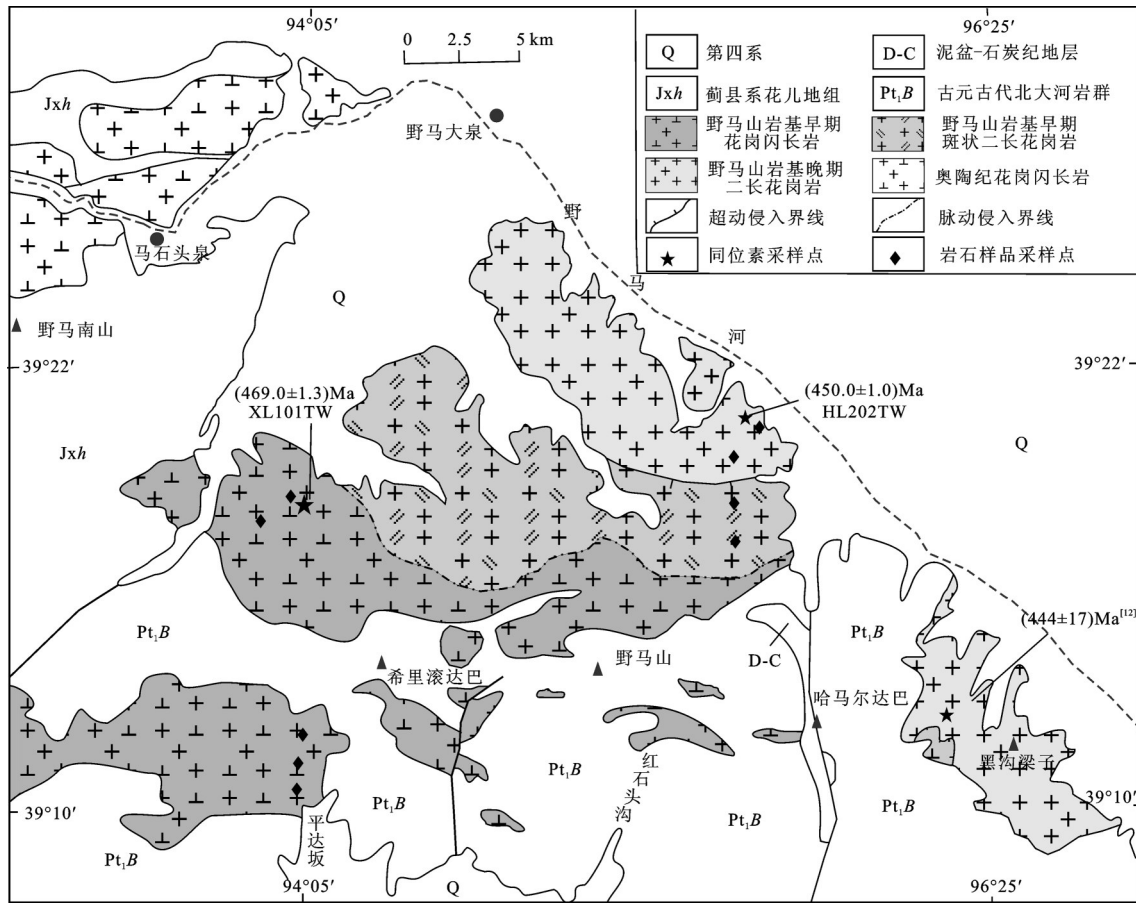


图2 野马山岩基地质图
Fig.2 Geological map of the Yemashan batholiths

四系覆盖。岩性为黑云母二长花岗岩。呈肉红色,中细粒花岗结构,块状构造。矿物组成:正长石(50%~55%):他形粒状,粒径1~2 mm,发育卡氏双晶;斜长石(20%~30%):半自形板状,粒径为0.5~1 mm,偶见卡纳复合双晶;石英(25%~30%):粒径0.5~1 mm,他形粒状,局部呈集合体状,黑云母(1%~5%):粒径0.1~0.5 mm,呈团块状集合体产出,副矿物主要为磁铁矿,含量小于1%。

3 样品及分析方法

3.1 化学全分析

本文选择野马山岩基代表不同期次和岩性的新鲜岩石样品9件,在国土资源部宜昌地质矿产研究所进行了主量元素、微量元素分析。除H₂O用重量法和FeO用容量滴定法测定外,其余主量元素都用X荧光光谱仪测定,分析精度(相对误差)优于

1%。微量和稀土元素采用X Series II等离子质谱仪,分析误差小于5%。

3.2 锆石LA-ICPMS U-Pb测年

根据野外地质特征,本文对出露面积最大的早期花岗闪长岩和晚期黑云母二长花岗岩,进行了锆石LA-ICPMS U-Pb同位素年代学研究。分别采集无蚀变的中细粒花岗闪长岩和细粒黑云母二长花岗岩各10 kg作为同位素分析样品。锆石的挑选在河北区域地质调查队实验室进行,先将其破碎至60~80目,用水淘洗粉尘,然后用磁铁将磁铁矿除去,重选出锆石等重矿物,最后在双目镜下挑选出晶形较好、透明锆石晶体。锆石U-Pb年龄在国土资源部天津地质矿产研究所进行,通过同位素实验室激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICPMS)来测定。采用质谱仪为Thermo Fisher公司制造的Neptune,激光剥蚀系统为ESI公

司生产的UP193-FX ArF准分子激光器,利用193 nm FX激光器对锆石进行剥蚀,激光斑束35 μm ,采用Adersen方法^[17]对普通铅进行校正,详细分析方法及仪器参数见李怀坤等^[40]。原始数据数据处理、年龄计算和绘图使用ICPMSDataCal程序^[18]和ISOPLOT程序^[19]。同位素比值误差为 1σ ,年龄值选 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,加权平均年龄误差为95%置信度误差。

4 测试结果

4.1 锆石U-Pb年代学

野马山岩基早期花岗闪长岩(XL202TW)中锆石呈透明-半透明,绝大多数为长柱状,少数为短柱状晶体,长150~300 μm ,宽50~100 μm ,长宽之比介于1:1~3:1,柱面{110}、{100}和锥面{111}均发育。晚期黑云母二长花岗岩(HL101TW)中锆石呈半透明,多数为短柱状晶体,少数为他形粒状晶体,长100~120 μm ,宽50~70 μm ,长宽比介于1:1~2:1。

早期花岗闪长岩(XL202)的锆石共测20个点,结果见表1和图3-a。从表中可以看出:锆石U含量为 269×10^{-6} ~ 973×10^{-6} ,Th含量介于 162×10^{-6} ~ 408×10^{-6} ,Th/U比值为0.3~0.6,与变质锆石不同(Th/U<0.1),属于岩浆锆石^[20]。所有测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为471~467 Ma,在谐和线上形成一个年龄集中区(图3-a), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为(469.0 \pm 1.3) Ma(MSWD = 0.9),表明野马山岩体早期花岗闪长岩形成时代为中奥陶世。

晚期黑云母二长花岗岩(HL101)中的锆石共测30个点,结果见表2和图3-b,从表中可以看出锆石U、Th含量变化大,分别为 34×10^{-6} ~ 8768×10^{-6} (平均 2523×10^{-6})和 66×10^{-6} ~ 6480×10^{-6} (平均 1186×10^{-6}),Th/U比值为0.1~2.9(平均0.7),显示出岩浆锆石的特点。在U-Pb谐和图上(图3-b),多数样点沿水平方向偏离谐和线,且3组年龄中 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ < $^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ < $^{206}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$,其原因可能是锆石封闭体系遭破坏,使放射成因的铅发生不同程度丢失。仅1、4、5、6、8、13、14、17、23、26等10个点投影于谐和线上,且 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄较接近,为475~319 Ma;而且除1、4、6号点外,其余7个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在451~450 Ma,并在谐和线上形成一个集中区, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为(450.0 \pm 1.0) Ma(MSWD = 0.85),准确反映了岩体形成年龄。值得

注意的是,如图3-b,由27粒锆石(除1、4、6样点)组成的不一致线与谐和曲线下交点年龄为(450.0 \pm 3.0) Ma,几乎与谐和线上的7粒锆石加权平均年龄一致,表明野马山岩基晚期二长花岗岩形成于晚奥陶世。4号点年龄为475 Ma,推测是捕获或继承的锆石。1、6号点年龄获得较低的谐和年龄,分别为319 Ma和426 Ma,可能代表了后期2次热事件发生的时代。

4.2 地球化学

4.2.1 主量元素

野马山岩基主量元素和微量元素分析数据见表3,从表中可以看出:早期岩体SiO₂为59.8%~64.2%,K₂O+Na₂O为4.48%~7.59%,且K₂O/Na₂O=1.1~1.8,平均1.4,里特曼指数(δ)为1.2~2.9,平均2.40。在TAS图中,主体位于花岗闪长岩区(图4-a),个别为落入闪长岩和石英二长岩区;在K₂O-SiO₂图解中多数落入高钾钙碱性系列区,少数为钾玄岩系列(图4-b);在(K₂O+Na₂O-CaO)-SiO₂图解(图4-c)中则多数为钙碱性系列区;个别为钙性、碱钙性系列区。样品Al₂O₃为14.4%~16.7%,CaO为3.52%~6.84%,A/NKC为0.8~1.0,且不含标准矿物刚玉分子,反映铝不饱和,属准铝质花岗岩(图4-d)。以上显示早期岩体岩石主体为高钾钙碱性准铝质花岗岩。

与早期岩体相比,晚期岩体具高硅(SiO₂为69.8%~76.5%),低铝、钙(Al₂O₃为12.1%~13.4%,CaO=0.60%~1.00%),富钾质(K₂O/Na₂O=1.2~1.7,平均1.5)和偏碱(K₂O+Na₂O=7.72%~8.55%)的特点。里特曼指数(δ)为1.9~2.7,平均2.2,为钙碱性系列。在TAS图中,样点位于花岗岩区(图4-a);在图4-b上,样点落入高钾钙碱性系列区;在图4-c中则多数为钙碱性系列岩石。A/NKC为1.0~1.1,标准矿物中见少量刚玉分子(0.23~0.69),反映铝过饱和,属弱过铝质花岗岩(图4-d)。总体反映为高钾钙碱性弱过铝质花岗岩特征。

4.2.2 稀土和微量元素特征

早期岩体稀土总量为 98×10^{-6} ~ 186×10^{-6} , $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为5.57~12.5,LREE/HREE=7.7~11.3,反映轻重稀土分馏明显,轻稀土富集。而 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ =4.22~9.27, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ =1.22~1.62,进一步显示轻稀土强分馏,而重稀土分馏较弱。球粒陨石标准化稀土

表1 野马山岩基花岗岩闪长岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 测年数据
Table 1 Zircon LA-ICPMS U-Pb isotopic data of tonalite from Yemashan batholiths

样号/点号 XL202TW	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值				年龄/Ma								
	Pb	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{216}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{216}\text{Pb}$						
1	64	833	291	0.3	0.0754	0.0005	0.5857	0.0040	0.0563	0.0003	469	3	468	3	465	12
2	75	973	408	0.4	0.0752	0.0005	0.5890	0.0026	0.0568	0.0002	467	3	470	2	484	8
3	70	929	327	0.4	0.0753	0.0004	0.5885	0.0026	0.0567	0.0002	468	3	470	2	479	9
4	49	638	232	0.4	0.0755	0.0004	0.5867	0.0034	0.0563	0.0003	469	3	469	3	465	13
5	46	613	220	0.4	0.0757	0.0005	0.5867	0.0028	0.0562	0.0002	470	3	469	2	461	10
6	71	942	341	0.4	0.0758	0.0004	0.5863	0.0024	0.0561	0.0002	471	3	469	2	457	8
7	61	809	299	0.4	0.0755	0.0005	0.5859	0.0035	0.0563	0.0002	469	3	468	3	463	9
8	58	779	273	0.3	0.0753	0.0005	0.5849	0.0026	0.0563	0.0002	468	3	468	2	465	8
9	47	625	252	0.4	0.0755	0.0005	0.5868	0.0028	0.0564	0.0003	469	3	469	2	468	11
10	47	622	228	0.4	0.0755	0.0005	0.5860	0.0037	0.0563	0.0004	469	3	468	3	463	14
11	58	778	283	0.4	0.0753	0.0005	0.5874	0.0031	0.0566	0.0002	468	3	469	2	474	8
12	55	744	254	0.3	0.0755	0.0005	0.5865	0.0028	0.0564	0.0002	469	3	469	2	466	8
13	21	269	162	0.6	0.0755	0.0004	0.5817	0.0041	0.0559	0.0003	469	3	466	3	447	14
14	66	874	357	0.4	0.0754	0.0005	0.5824	0.0028	0.0560	0.0002	469	3	466	2	453	8
15	44	597	194	0.3	0.0754	0.0005	0.5833	0.0033	0.0561	0.0002	468	3	467	3	458	9
16	54	714	234	0.3	0.0756	0.0005	0.5881	0.0041	0.0565	0.0003	470	3	470	3	470	12
17	54	719	278	0.4	0.0754	0.0004	0.5851	0.0027	0.0563	0.0002	469	3	468	2	464	8
18	59	794	252	0.3	0.0756	0.0005	0.5869	0.0024	0.0563	0.0003	470	3	469	2	466	10
19	62	821	314	0.4	0.0755	0.0005	0.5873	0.0028	0.0564	0.0002	469	3	469	2	469	8
20	28	361	178	0.5	0.0754	0.0005	0.5844	0.0036	0.0562	0.0003	468	3	467	3	462	12

表 2 野马山岩基二长花岗岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 测年数据
Table 2 Zircon LA-ICPMS U-Pb isotopic data of adamellite from Yemashan batholiths

样号/点号	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值				年龄/Ma															
	Pb	U		Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	1σ											
	1σ	1σ		1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ											
HL101TW																							
1	361	6871	2378	0.3	0.0507	0.0003	0.3690	0.0018	0.0528	0.0002	0.0002	319	2	319	2	319	2	319	2	319	8		
2	621	3794	6480	1.7	0.0723	0.0007	4.4949	0.0489	0.4506	0.0016	0.0016	450	5	1730	19	4087				4087	5		
3	414	2074	3733	1.8	0.0723	0.0005	3.3620	0.0238	0.3371	0.0016	0.0016	450	3	1496	11	3650				3650	7		
4	39	502	245	0.5	0.0764	0.0005	0.5957	0.0068	0.0565	0.0007	0.0007	475	3	475	5	474				474	26		
5	363	4861	2439	0.5	0.0725	0.0005	0.5584	0.0029	0.0559	0.0002	0.0002	451	3	450	2	447				447	7		
6	346	5140	1415	0.3	0.0684	0.0006	0.5218	0.0135	0.0554	0.0009	0.0009	426	4	426	11	427				427	37		
7	488	5401	1487	0.3	0.0723	0.0006	1.5088	0.0386	0.1513	0.0031	0.0031	450	4	934	24	2360				2360	35		
8	29	366	244	0.7	0.0726	0.0004	0.5582	0.0083	0.0558	0.0008	0.0008	452	3	450	7	444				444	32		
9	285	3738	2022	0.5	0.0724	0.0004	0.6567	0.0026	0.0658	0.0002	0.0002	450	3	513	2	801				801	7		
10	14	176	143	0.8	0.0723	0.0005	0.7213	0.0165	0.0723	0.0014	0.0014	450	3	551	13	995				995	39		
11	25	314	227	0.7	0.0723	0.0005	0.6437	0.0050	0.0645	0.0005	0.0005	450	3	505	4	759				759	18		
12	128	1761	244	0.1	0.0723	0.0061	0.8012	0.0250	0.0804	0.0011	0.0011	450	38	598	19	1207				1207	27		
13	13	174	79	0.5	0.0723	0.0006	0.5572	0.0067	0.0559	0.0006	0.0006	450	4	450	5	447				447	26		
14	19	245	303	1.2	0.0725	0.0005	0.5578	0.0046	0.0558	0.0004	0.0004	451	3	450	4	444				444	18		
15	213	2588	1142	0.4	0.0723	0.0005	1.0539	0.0090	0.1057	0.0007	0.0007	450	3	731	6	1727				1727	12		
16	20	232	185	0.8	0.0723	0.0005	0.9424	0.0106	0.0945	0.0010	0.0010	450	3	674	8	1518				1518	21		
17	211	2866	1376	0.5	0.0724	0.0005	0.5576	0.0022	0.0559	0.0002	0.0002	451	3	450	2	447				447	7		
18	178	2265	718	0.3	0.0724	0.0009	0.7848	0.0136	0.0786	0.0005	0.0005	451	6	588	10	1163				1163	12		
19	54	723	364	0.5	0.0723	0.0004	0.6420	0.0028	0.0644	0.0002	0.0002	450	3	504	2	754				754	8		
20	329	4408	277	0.1	0.0723	0.0005	1.3479	0.0090	0.1351	0.0006	0.0006	450	3	867	6	2166				2166	8		
21	42	509	281	0.6	0.0723	0.0007	0.9767	0.0052	0.0979	0.0008	0.0008	450	4	692	4	1585				1585	16		
22	66	788	935	1.2	0.0723	0.0005	0.7192	0.0037	0.0721	0.0004	0.0004	450	3	550	3	989				989	11		
23	497	6988	1820	0.3	0.0724	0.0005	0.5578	0.0026	0.0559	0.0002	0.0002	450	3	450	2	448				448	6		
24	212	2834	886	0.3	0.0724	0.0008	0.7085	0.0072	0.0710	0.0002	0.0002	450	5	544	6	957				957	6		
25	64	733	544	0.7	0.0723	0.0005	1.1933	0.0341	0.1197	0.0030	0.0030	450	3	797	23	1951				1951	45		
26	30	409	202	0.5	0.0723	0.0005	0.5587	0.0038	0.0564	0.0003	0.0003	450	3	451	3	469				469	11		
27	5	34	66	1.9	0.0723	0.0017	3.7861	0.2218	0.3798	0.0455	0.0455	450	11	1590	93	3831				3831	181		
28	724	8768	2792	0.3	0.0724	0.0006	0.9859	0.0136	0.0988	0.0008	0.0008	450	4	697	10	1601				1601	15		
29	467	5555	890	0.2	0.0723	0.0009	1.0984	0.0404	0.1101	0.0030	0.0030	450	6	753	28	1802				1802	50		
30	58	575	1658	2.9	0.0723	0.0006	1.4929	0.0199	0.1497	0.0018	0.0018	450	4	928	12	2343				2343	20		

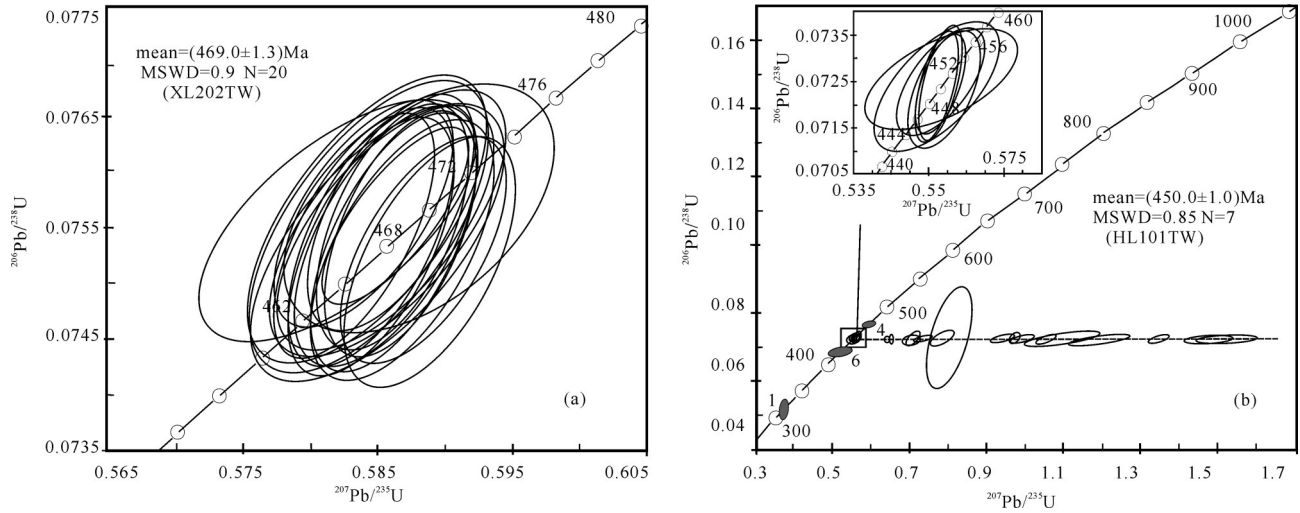


图3 野马山岩基锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ – $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和曲线年龄图
 Fig.3 Zircon $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ concordia diagram and average age of Yemashan batholiths

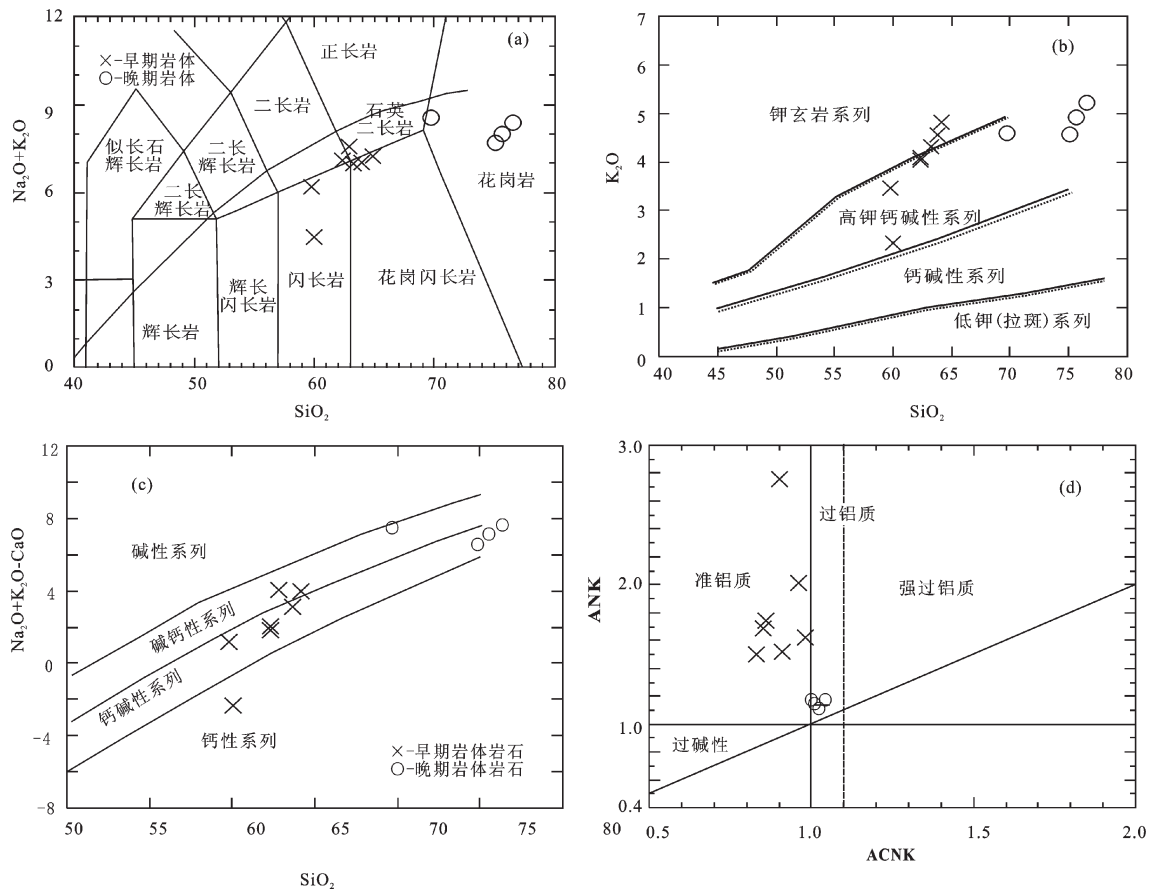


图4 TAS图(a, 据文献[21]), SiO_2 – K_2O 图(b, 据参考文献[22]), SiO_2 – $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO})$ 图(c, 据文献[21])和 A/NK – A/CNK 图(d, 据文献[22])

Fig.4 TAS (a, after reference [21]), SiO_2 versus K_2O (after reference [22]), SiO_2 versus $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO})$ (c, after reference [23]) and A/NK versus A/CNK (d, after reference [24]) diagrams of Yemashan batholiths

表3 野马山岩基岩石化学(%)及稀土微量元素(10^{-6})分析结果
 Table 3 Chemical compositions (%), REE and trace elements (10^{-6}) content of Yemashan batholiths

分析项目	早期										晚期	
	花岗岩长岩					斑状二长花岗岩					二长花岗岩	
	PM63w1	PM63w2	PM63w3	PM38w3	PM38w4	PM70w1	PM70w2	PM70w3	PM70w4	X-21	X-22	
SiO ₂	62.9	62.3	62.3	60.0	59.8	63.6	64.2	76.5	75.1	75.7	69.8	
Al ₂ O ₃	16.2	16.0	15.8	16.7	16.7	14.4	14.7	12.3	12.1	12.4	13.4	
Fe ₂ O ₃	0.64	0.91	0.63	2.44	2.73	1.43	1.31	1.37	1.24	0.52	3.86	
FeO	3.70	4.57	4.60	4.22	4.42	3.41	3.29	0.12	1.46	0.90	1.19	
CaO	3.57	5.12	5.05	6.84	5.01	4.29	3.52	0.60	1.00	0.75	0.90	
MgO	2.22	2.39	2.26	2.09	2.75	2.01	1.99	0.08	0.18	0.40	0.32	
K ₂ O	4.39	4.03	4.10	2.34	3.47	4.70	4.81	5.22	4.57	4.92	4.58	
Na ₂ O	3.20	2.92	2.98	2.14	2.74	2.72	2.71	3.15	3.15	3.10	3.97	
TiO ₂	0.61	0.67	0.64	0.60	0.78	0.48	0.46	0.07	0.17	0.12	0.21	
P ₂ O ₅	0.17	0.19	0.18	0.29	0.21	0.16	0.15	0.02	0.04	0.03	0.01	
MnO	0.08	0.09	0.08	0.14	0.13	0.07	0.07	0.02	0.01	0.03	0.08	
LOI	1.42	0.61	0.18	1.16	0.06	1.83	1.85	0.34	0.37	0.66	0.96	
H ₂ O ⁺	1.38	0.90	0.38	1.41	1.43	1.36	1.56	0.37	0.56	0.40	0.40	
Tatal	100	101	99	100	100	100	101	100	100	100	100	
A/NKC	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	0.8	0.9	1.0	1.0	1.1	1.0	
δ	2.9	2.5	2.6	1.2	2.3	2.7	2.7	2.1	1.9	2.0	2.7	
AR	2.2	2.0	2.0	1.5	1.8	2.3	2.4	4.7	3.9	4.1	4.0	
F	820	848	788	600	569	690	657	754	1320	-	-	
Cr	53.0	63.6	59.4	14.9	23.6	95.7	36.5	9.95	12.2	46.6	6.71	
Li	30.4	32.7	32.6	21.0	20.8	20.6	20.5	6.09	21.6	-	-	
Rb	172	155	142	79.0	81.1	145	194	330	330	-	-	
Cs	3.95	7.06	7.43	1.67	3.58	2.30	3.72	7.20	8.80	9.33	6.75	
Sr	203	218	185	510	504	248	261	19.5	25.2	24.7	64.3	
Ba	507	452	463	460	796	480	572	201	99.9	201	350	
Sc	9.23	11.2	10.7	12.8	15.7	9.28	9.27	6.22	5.68	-	-	
Nb	14.1	14.8	14.1	12.0	7.86	12.2	10.9	14.8	24.9	30.1	30.7	
Ta	1.30	1.28	1.22	0.72	0.46	1.07	0.93	2.63	2.97	2.51	2.67	
Zr	153	152	148	170	126	155	182	58.0	118	171	266	
Hf	5.03	5.04	4.69	5.19	3.84	4.88	5.47	3.07	5.48	6.53	8.8	
Sn	9.20	9.90	13.0	9.50	10.0	13.0	10.0	1.20	4.40	-	-	
U	2.61	2.72	1.26	1.54	1.38	1.99	2.63	2.45	3.70	5.49	6.1	
Th	16.4	12.8	8.94	5.58	5.89	23.2	22.9	11.5	34.6	17.9	47.7	
Ti	3656	4010	3848	3608	4681	2889	2775	438	1043	719	1259	
P	360	404	391	633	456	338	336	39	87	65	22	
K	18219	16725	17016	9711	14401	19506	19962	21664	18966	20419	19008	
La	28.6	36.7	33.4	24.8	19.4	44.2	37.5	14.2	47.8	20.1	56.9	
Ce	52.3	67.5	61.3	46.9	36.7	78.7	70.2	31	97	-	-	
Pr	6.47	8.39	7.41	6.3	4.9	9.43	8.1	4.38	12.4	5.98	13.1	
Nd	23.4	29.5	25.7	24	18.4	31.8	27.7	16.3	42.1	22.9	47.3	
Sm	4.54	5.59	4.83	5.1	3.81	5.45	4.85	4.15	8.72	5.52	9.87	
Eu	1.26	1.32	1.35	1.35	1.09	1.13	1.14	0.32	0.3	0.19	0.42	
Gd	4.14	5.01	4.29	4.6	3.55	4.8	4.35	3.94	8.14	3.51	6.51	
Tb	0.67	0.77	0.7	0.78	0.6	0.69	0.63	0.82	1.46	0.98	1.62	
Dy	3.92	4.41	4.05	4.47	3.53	3.67	3.44	5.28	9.13	6.22	9.36	
Ho	0.77	0.87	0.79	0.89	0.7	0.72	0.66	1.11	1.9	1.6	2.1	
Er	2.18	2.47	2.29	2.56	2	2.08	1.88	3.42	5.83	4.64	5.83	
Tm	0.4	0.44	0.4	0.46	0.36	0.36	0.34	0.7	1.14	0.8	0.93	
Yb	2.6	2.78	2.66	2.99	2.35	2.39	2.23	5.04	7.86	5.62	6.71	
Lu	0.4	0.4	0.38	0.44	0.34	0.34	0.32	0.73	1.14	0.91	1.05	
Y	21.7	24.1	22	24.8	19.4	20.9	18.8	32.3	55.2	39.4	65.2	
Σ REE	132	166	150	126	98	186	163	91.4	245	79.0	162	
δ Eu	0.87	0.75	0.89	0.84	0.89	0.66	0.74	0.24	0.11	0.12	0.15	
(La/Yb) _N	7.42	8.90	8.47	5.59	5.57	12.5	11.3	1.90	4.10	2.41	5.72	
(La/Sm) _N	5.38	6.59	5.87	4.36	4.22	9.27	7.80	10.5	37.8	25.1	32.1	
(Gd/Yb) _N	1.28	1.45	1.30	1.24	1.22	1.62	1.57	0.63	0.84	0.50	0.78	
Nb/Ta	11	12	12	17	17	11	12	6	8	12	11	
Zr/Hf	30	30	32	33	33	32	33	19	22	26	30	

注：“-”表示未测定；X-21和X-22数据引用文献[12]。

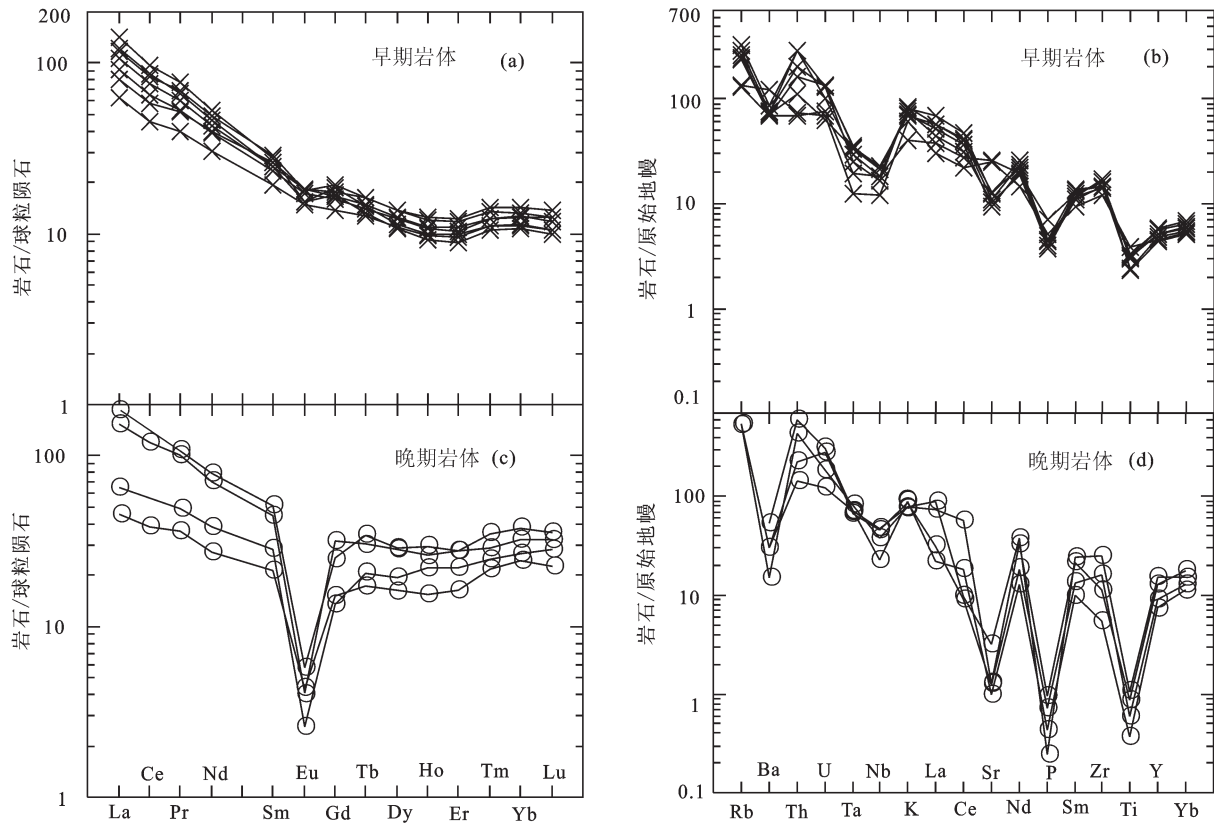


图5 稀土元素球粒陨石标准化配分模式(a,c, 标准化值据文献[25])和微量元素地幔标准化蛛网图(b,d, 标准化值据文献[26])
Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns (a,c, normalized data after reference [25]) and primitive mantle normalized trace element spider diagrams (b,d, normalized data after reference [26]) of Yemashan batholiths

元素配分模式(图5-a)表现为右倾,轻重稀土强分异,弱负铕异常(δEu 为0.66~0.89)的特征。在原始地幔标准化蛛网图上(图5-b),表现为Ba、Nb、Ta、Sr、P、Ti的负异常和Rb、U、Th的正异常。

晚期岩体稀土总量变化较大($\sum\text{REE}=79\times 10^{-6}\sim 245\times 10^{-6}$),轻稀土弱富集(LREE/HREE=3.3~5.7);轻重稀土分馏明显($(\text{La}/\text{Yb})_N=1.90\sim 5.72$)。球粒陨石标准化稀土配分模式也表现为右倾,但轻稀土较陡($(\text{La}/\text{Sm})_N=10.5\sim 37.8$),重稀土较平缓($(\text{Gd}/\text{Yb})_N=0.50\sim 0.84$),强负铕异常($\delta\text{Eu}=0.11\sim 0.24$) (图5-c)。原始地幔标准化微量蛛网图(图5-d)表现出比早期岩体更强的Ba、Sr、P、Ti的负异常和较弱的Nb、Ta异常。Nb/Ta比值和Zr/Hf比值也较早期岩石低,分别为6~12和19~30。

5 讨论

5.1 成岩时代

野马山岩基具多期多阶段侵入的特征。由表

1、2及图3可知,早期岩体锆石LA-ICPMS U-Pb年龄为(469.0 \pm 1.3) Ma,侵位时代属中奥陶世;而晚期岩体锆石LA-ICPMS U-Pb年龄为(450.0 \pm 1.0) Ma,形成于晚奥陶世。在研究区SW 20 km,齐瑞荣^[15]测得巴嘎德德基二长花岗岩锆石U-Pb年龄为(462.9 \pm 1.4) Ma,与野马山岩基早期岩体侵入时代相吻合;晚期岩体侵位时代则与黑沟梁子花岗岩(444 \pm 17) Ma^[12]相接近。表明野马山岩基为中祁连西段早古生代中期岩浆活动的产物。

近年来,在中祁连地块内相继发现了一批年龄在512~400 Ma的早古生代中酸性侵入岩体。比如,中祁连中东段的什川二长花岗岩(445 Ma)^[27],湟源董家庄二长花岗岩和新店二长花岗岩(分别为447 Ma和454 Ma)^[28],陇山王家岔石英闪长岩(455 Ma)^[29],以及马家沟二长花岗岩(473 Ma)^[7];中祁连西段的石包城、肃北县花岗岩体(分别为435 Ma和415 Ma)^[14],巴嘎德德基二长花岗岩(463 Ma)^[15]。这些花岗岩体和本文研究的野马山岩基一起呈带状

展布,并与野牛台奥陶纪岛弧型火山-沉积建造^[30]、扎麻什等阿拉斯加型基性-超基性杂岩体^[31],以及北祁连中段南缘的柯柯里、野马咀、牛心山等花岗岩体(512~477 Ma)^[10-11],共同构成了中祁连地块北缘早古生代构造岩浆带,表明中祁连在早古生代时期具活动性陆缘性质。而且岩浆活动大致集中在3个区段:512~463 Ma, 454~435 Ma和415 Ma,所对应的地质时代为晚寒武世-早中奥陶世、晚奥陶世-志留纪和早泥盆世,贯穿了整个早古生代。

5.2 岩石成因及构造环境

花岗岩成因历来是花岗岩研究的重要基础问题,也是争论最多的方面之一。已有众多学者从岩石学、矿物学和地球化学等方面提出了各类型花岗岩(ISAM型)判别标志,并论述了成因机制^[23, 32-35]。Miller^[36]和吴福元等^[37]认为角闪石、堇青石、碱性暗色矿物是判别花岗岩成因最有效的矿物学标志,但需要综合岩石学、地球化学,尤其是地质背景等多种证据来判别。

野马山岩基早期岩体由花岗闪长岩和斑状二长花岗岩组成,暗色矿物主要为普通角闪石,副矿物为磁铁矿、磷灰石、榍石,具I型花岗岩矿物学特征。地球化学上,里特曼指数为1.2~2.9, A/NKC<1,标准矿中未见刚玉分子,属钙碱性准铝质岩石。轻稀土富集,轻重稀土强分异,弱负铈异常的稀土配

分模式,以及Nb、Ta、P、Ti等高场强元素亏损和高Nb/Ta比值(11~17)、Zr/Hf比值(30~33)的微量元素特征,表明早期岩体为I型花岗岩。图7中显示其形成的构造环境应为板块碰撞前火山弧环境。结合岩体形成时代和区域构造背景,认为早期岩体形成于陆缘弧环境。

晚期岩体岩性为黑云母二长花岗岩,缺乏划分成因类型的标志性矿物,从矿物学上难以判别成因类型。岩石里特曼指数(δ)为1.9~2.7,属钙碱性花岗岩,在SiO₂-K₂O图(图4-b)中也落入高钾钙碱性系列区,这与碱性系列的A型花岗岩明显不同,一般后者为碱性岩系列; A/NKC为1.0~1.1,标准矿物中见少量刚玉分子(0.23~0.69),为弱过铝质花岗岩,与S型花岗岩差异也较大,一般后者 A/NKC>1.1, CIPW标准矿物中刚玉分子含量>1%。实验表明,在准铝质-弱过铝质I型花岗岩浆中,磷灰石的溶解度很低,并在岩浆分异过程中趋于早期结晶,形成的岩石SiO₂与P₂O₅呈负相关性;而过铝的S型花岗岩浆中磷灰石溶解度变化与之相反,形成的岩石SiO₂与P₂O₅呈正相关关系^[38]。利用这种磷灰石溶解度的差异,可以划分I型和S型花岗岩^[40-41]。野马山岩基晚期岩体P₂O₅含量较低(0.01%~0.04%),低于S型花岗岩(>0.20%)^[32],在图6-a中除样品x-22外,其余P₂O₅与SiO₂含量均呈负相关,表现出I型花岗岩

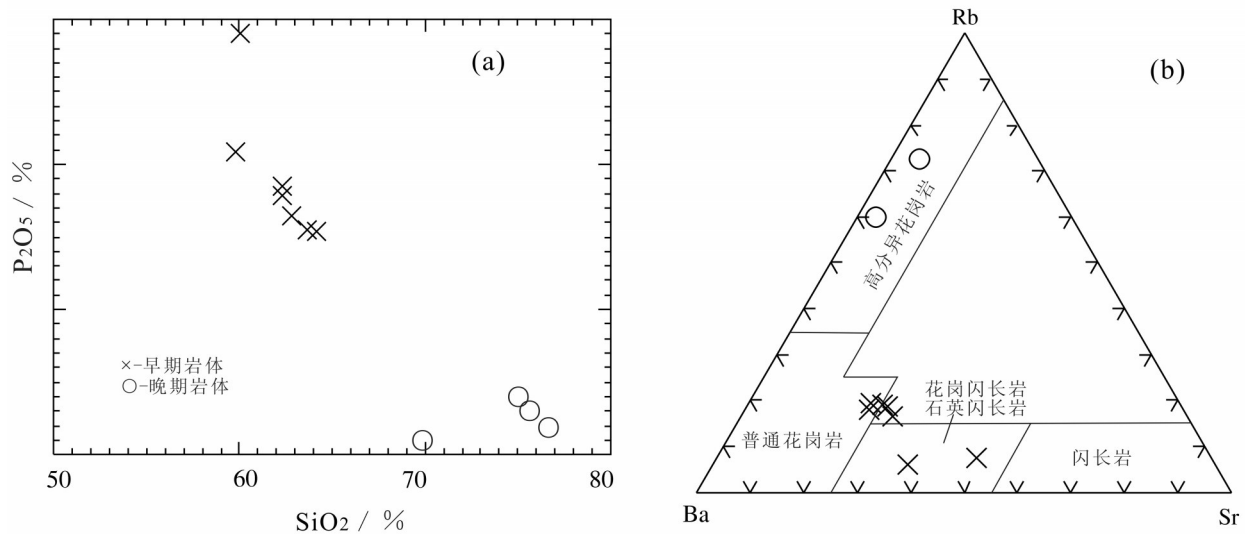


图6 野马山岩基SiO₂-P₂O₅图解(a)和Rb-Sr-Ba图解(b, 据文献[39])

Fig.6 SiO₂-P₂O₅ (a) and Rb-Sr-Ba (b, after reference [39]) diagrams of Yemashan batholiths

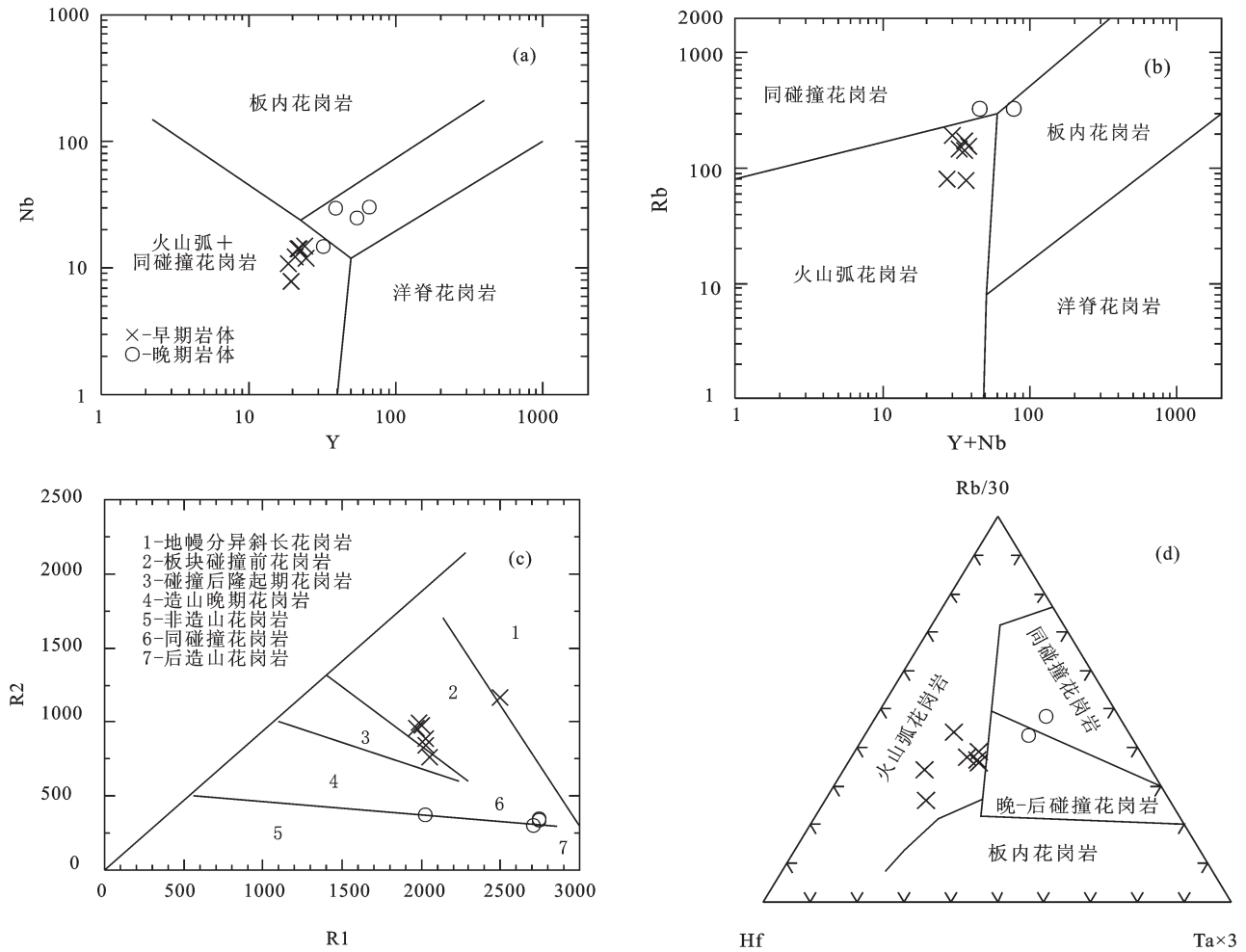


图7 野马山岩基构造环境判别图(a、b据文献[42]; c据文献[43]; d据文献[44])

Fig.7 Tectonic setting diagrams of Yemashan batholiths (a and b, after reference [42]; c, after reference [43]; d, after reference [44])

的演化趋势。稀土配分曲线具强烈的铕负异常,微量元素显示强烈的Ba、Sr、P、Ti的亏损和低的Nb/Ta比值和Zr/Hf比值,具高强分异的I型花岗岩特征(图6-b)。综合以上研究,认为野马山岩基晚期岩体应为高分异的I型花岗岩。在Y-Nb图(图7-a)中多数落入板内花岗岩区;在(Y+Nb)-Rb图解(图7-b)中落入同碰撞花岗岩与板内花岗岩界线附近;而在R1-R2图解中(图7-c)中样点位于同碰撞花岗岩和后造山花岗岩界线上;在Rb/30-Hf-Ta×3图解中(图7-d)样点落入晚-后碰撞与同碰撞花岗岩接线附近。结合岩体形成时代(450 Ma)及区域背景,认为应形成于后碰撞环境。

5.3 地质意义

研究表明,北祁连洋裂解始于新元古代(约679

Ma),于寒武纪末(大约495 Ma),形成具有一定规模的洋盆,发育具MORB特征的基性熔岩^[5, 49];在早奥陶世(大约490 Ma)洋盆发生俯冲消减,形成火山弧和超高压变质杂岩^[5, 8]。中奥陶世末的“古浪运动”(467~450 Ma),使得北祁连洋盆闭合,中祁连地块与阿拉善地块发生碰撞,进入陆陆碰撞构造阶段^[45-46],造成祁连山区上陶统地层普遍不整合于中奥陶统地层之上^[16]和俯冲增生杂岩的构造侵位^[3, 47]。早泥盆世大量磨拉石建造的出现^[48],标志北祁连山转入陆内构造演化阶段。

野马山岩基早期岩体侵位于中奥陶世,同位素年龄为(469.0±1.3) Ma,具I型花岗岩特征,形成于陆缘弧环境,很可能为北祁连洋向中祁连俯冲消减过程中形成的中酸性岩体;而晚期岩体侵位于晚奥陶

世, 同位素年龄为(450.0±1.0) Ma, 为高分异的I型花岗岩, 具后碰撞花岗岩特征, 代表了中祁连地块与阿拉善地块晚奥陶世发生碰撞作用的产物。

前已述及, 目前不同地质学家对北祁连洋俯冲极性问题存在较大分歧, 有向北、向南和双向俯冲等不同观点^[3-10]。根据本文研究结果, 结合近年来中祁连, 以及北祁连南缘花岗岩的研究进展, 认为北祁连洋在晚寒武世—早奥陶世形成洋盆后, 开始向两侧俯冲, 即双向俯冲。北东俯冲于华北板块之下, 形成绵延上千千米的岛弧火山岩系和弧后盆地^[5]; 同时向南西俯冲于中祁连地块之下, 形成中祁连地块, 以及北祁连南缘巨量花岗质岩浆的侵入。很可能向南俯冲时, 由于俯冲角度缓, 在中祁连北缘未形成岛弧火山岩系和弧后盆地, 而形成以野马山岩基为代表的中酸性侵入岩记录了这一过程。

6 主要认识

(1)中祁连西段的野马山岩基为早古生代岩浆活动的产物, 分2期: 早期为花岗闪长岩和似斑状二长花岗岩, 侵位时代为(469.0±1.3) Ma; 晚期为黑云母二长花岗岩, 侵位时代为(450.0±1.0) Ma。

(2)野马山岩基早期岩体为钙碱性准铝质花岗岩, 成因为I型花岗岩, 形成于俯冲环境; 晚期属钙碱性弱铝质花岗岩, 具高分异的I型花岗岩特征, 形成于后碰撞环境。

(3)根据野马山岩基形成时代、成因及构造环境, 结合近年来对中祁连及其南缘花岗岩研究进展, 认为北祁连洋在寒武纪末—早奥陶世发生双向俯冲, 可能是俯冲角度缓的原因, 在中祁连地块北缘未形成岛弧火山岩系和弧后盆地, 而以中酸性岩浆的侵入记录了这一过程。

致谢: 感谢为填制本文所依赖的1:5万基础地质资料而付出艰辛劳动的甘肃地调院308项目组地质人员; 感谢国土资源部天津地质矿产研究所李怀坤研究员在锆石年龄测试方面的支持和帮助, 感谢审稿人和编辑老师杨艳提出的建设性的意见和建议, 对提高本文质量有重要意义。

参考文献 (References):

[1] 冯益民, 何世平. 祁连山大地构造与造山作用[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
Fen Yiming, He Shiping. Geotectonics and Orogeny of Qilian

Mountain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996(in Chinese).

[2] 张旗, 孙晓猛, 周德进. 祁连蛇绿岩的特征、形成环境及构造意义[J]. 地球科学进展, 1997, 12(4): 366-393.
Zhang Qi, Sun Xiaomeng, Zhou Dejin, et al. The characteristic of North Qilian ophiolites, forming settings and their tectonic significance[J]. Advance in Earth Sciences, 1997, 12(4): 366-393(in Chinese with English abstract).

[3] 张建新, 许志琴, 陈文, 等. 北祁连中段俯冲-增生杂岩/火山弧的时代探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 1997, 16: 112-119.
Zhang Jianxin, Xu Zhiqing, Chen Wen, et al. A tentative discussion on the ages of the subduction-accretionary complex/volcanic arc in the middle sector of North Qilian Mountain[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1997, 16: 112-119(in Chinese with English abstract).

[4] 左国朝, 吴汉泉. 北祁连山中段早古生代双向俯冲-碰撞造山模式剖析[J]. 地球科学进展, 1997, 12(4): 315-323.
Zuo Guochao, Wu Hanquan. A bisubduction-collision orogenic model of early Paleozoic in the middle part of north Qilian area[J]. Advance in Earth Sciences, 1997, 12(4): 315-323(in Chinese with English abstract).

[5] 夏林圻, 夏祖春, 任有祥. 祁连山及邻区火山作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
Xia Linqi, Xia Zuchun, Ren Youxiang. The Volcanism and Mineralization from Qilian Mountains and Adjacent Regions[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998(in Chinese).

[6] 汤中立, 白云来. 北祁连造山带两种构造基底岩块及成矿系统[J]. 甘肃地质学报, 2001, 10(2): 1-11.
Tang Zhongli, Bai Yunlai. The two types of the tectonic foundation block and its metallogenic systems in the Northern Qilianshan orogenic belt[J]. Acta Geologica Gansu, 2001, 10(2): 1-11(in Chinese with English abstract).

[7] 贾群子, 杨忠堂, 肖朝阳, 等. 祁连山铜金钨铅锌矿床成矿规律和成矿预测[M]. 2007. 北京: 地质出版社,
Jia Qunzi, Yang Zhongtang, Xiao Chaoyang, et al. The Metallogenic Regularity and Metallogenic Prognosis of the Copper, Gold, Tungsten, Lead, Zinc Deposits in Qilian Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007 (in Chinese).

[8] 宋述光. 北祁连山古大洋俯冲带高压变质岩研究评述[J]. 地质通报, 2009, 28(12): 1769-1778.
Song Shuguang. High-pressure metamorphic rocks in the North Qilian oceanic subduction zone, China: A review[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(12): 1769-1778(in Chinese with English abstract).

[9] 吴才来, 杨经绥, 杨宏仪, 等. 北祁连东部两类I型花岗岩定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2004, 20(03): 425-432.
Wu Cailai, Yang Jinsui, Yang Hongyi, et al. Dating of two types of granite from north Qilian, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004,

- 20(3): 425–432(in Chinese with English abstract).
- [10] 吴才来, 姚尚志, 杨经绥, 等. 北祁连洋早古生代双向俯冲的花岗岩证据[J]. 中国地质, 2006, 33(6): 1196–1208.
Wu Cailai, Yao Shangzhi, Yang Jingsui, et al. Double subduction of the Earth Paleozoic North Qilian oceanic plate: evidence from granites in the central segment of North Qilian, NW China[J]. *Geology in China*, 2006, 33(6): 1196–1208(in Chinese with English abstract).
- [11] 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 Cailai, Xu xueyi, Gao Qianming, et al. Early Palaeozoic granitoid magmatism and tectonic evolution in North Qilian, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(4): 1027–1044(in Chinese with English abstract).
- [12] 苏建平, 胡能高, 张海峰, 等. 中祁连西段黑沟梁子花岗岩的锆石 U–Pb 同位素年龄及成因[J]. 现代地质, 2004, 18(1): 70–75.
Su Jianping, Hu Nenggao, Zhang Haifeng, et al. U–Pb zircon dating and genesis of Heigouliangzi granitic intrusion in the west segment of the middle Qilian Mountains[J]. *Geoscience*, 2004, 18(1): 70–75(in Chinese with English abstract).
- [13] 苏建平, 胡能高, 张海峰, 等. 中祁连西段野马南山埃达克质花岗岩的地球化学特征及成因[J]. 中国地质, 2004, 31(4): 365–371.
Su Jianping, Hu Nenggao, Zhang Haifeng, et al. Geochemical characteristics and genesis of adakite–like granites at Yemanashan in the western segment of the Central Qilian Mountains. *Geology in China*[J]. *Geology in China*, 2004, 31(4): 365–371(in Chinese with English abstract).
- [14] 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): 2431–2344.
Li Jianfeng, Zhang Zhicheng, Han Baofu. Geochronology and geochemistry of Early Paleozoic plutons from Subei and Shibaocheng areas, the western segment of Central Qilian and their Geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(8): 2431–2344(in Chinese with English abstract).
- [15] 齐瑞荣. 中祁连西段巴嘎德德基岩体 LA–ICPMS 锆石 U–Pb 年龄及地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2012, 32(4): 86–93.
Qi Ruirong. LA–ICPMS Zircon U–Pb ages and Geological implication for the Bagadeerji granitic Plutons in the central Qilian Mountains, Gansu[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2012, 32(4): 86–93(in Chinese with English abstract).
- [16] 甘肃地质矿产局. 甘肃省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province. *Regional Geology of Gansu Province*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989 (in Chinese).
- [17] Andersen T. Correction of common lead in U–Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1/2): 59–79.
- [18] Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA–ICPMS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1/2): 34–43.
- [19] Ludwig K R. User's Manual for Isoplot 3. 00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2003.
- [20] Hoskin P W O, Black L P. Metamorphic zircon formation by solid–state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2000, 18(4): 423–439.
- [21] Irvine TH and Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, 8(5): 523–548.
- [22] Richter F M. Simple models for trace element fractionation during melt segregation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1989, 77(3/4): 333–344.
- [23] Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42(11): 2033–2048.
- [24] Maniar P D and Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101: 635–643.
- [25] Boynton W V, Bowden P. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite study[C]//Henderson P (ed). *Rare Earth Element Geochemistry*, Elsevier, 1984, 63–114.
- [26] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotope systematic of oceanic basalts: Implication for the mantle composition and processes[C]//Saunders A D and Norry M J (eds). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society of London Special Publication, 1989, 42(1): 313–345.
- [27] 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 Junlu, Xu Xueyi, Zeng Zuoxun, 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(in Chinese with English abstract).
- [28] 雍翔, 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 Yong, Xiao Wenjiao, Yuan Chao, et al. Geochronology and geochemistry of Paleozoic granitic Plutons from the eastern Central Qilian and their tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(4): 855–866(in Chinese with English abstract).
- [29] 陈隽璐, 李好斌, 王洪亮, 等. 秦祁结合部王家岔石英闪长岩体锆石 LA–ICPMS 定年及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(3): 423–431.
Chen Junlu, Li Haobin, Wang Hongliang, et al. LA–ICPMS zircon U–Pb dating of a quartz diorite pluton from Wangjiacha, the junction area between the Qingling and Qilian orogenic belts and its tectonic significance[J]. *Journal of Jilin University(Earth*

- Science edition), 2007, 37(3): 423–431(in Chinese with English abstract).
- [30] 王永和, 焦养泉, 李建星, 等. 中祁连北缘奥陶纪岩浆弧地层[J]. 现代地质, 2008, 22(5): 724–732.
Wang Yonghe, Jiao Yangquan, Li Jianxing, et al. Ordovician magmatic arc stratum of the middle Qilian Block. Geoscience, 2008, 22(5): 724–732(in Chinese with English abstract).
- [31] 周德进, 陈雨, 张旗, 等. 北祁连山南侧阿拉斯加型岩体的发现及地质意义[J]. 地质科学, 1997, 31(1): 122–127.
Zhou Dejin, Chen Yu, Zhang Qi, et al. The founding of Alaska-type mafic-ultramafic complex from Qilian county and constraints on Qilian Mt. tectonic evolution[J]. Scientia Geologica Sinica, 1997, 31(1): 122–127(in Chinese).
- [32] Chappell B W. Aluminum saturation in I and S type granite and the characterization of fractionated haplogranite[J]. Lithos, 1999, 46: 535–551.
- [33] 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: 407–419.
- [34] Sylvester P J. Post-collisional Strongly Peralkaline Granites[J]. Lithos, 1998, 45: 29–44.
- [35] Barbarin B. A review of relationship between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. Lithos, 1999, 46: 605–626.
- [36] Miller C F. Are strongly peraluminous magmas derived from pelitic sedimentary source?[J]. J. Geol., 1985, 93(6): 673–689.
- [37] 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, Lixianhua, Yangjinhui, et al. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(6): 1217–1238(in Chinese with English abstract).
- [38] Wolf M B, London D. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melt: An experimental study of solubilities and mechanisms[J]. Geochemica et Cosmochimica Acta, 1994, 58 (19): 4127–4245.
- [39] Muller D and Groves D I. Potassic Igneous Rocks and Associated Gold-Copper Mineralization. 2nd Edition[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1997, 1–238.
- [40] 李怀坤, 朱士兴, 向振群, 等. 北京延庆高于庄组凝灰岩锆石 U-Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束[J]. 岩石学报, 2010, 26(8): 2131–2140.
Li Huikun, Zhu Shixing, Xiang Zhenqun, et al. Zircon U-Pb dating on tuff bed from Gaoyuzhuang Formation in Yanqing, Beijing: Further constraints on the new subdivision of the Mesoproterozoic stratigraphy in the northern North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(8): 2131–2140(in Chinese with English abstract).
- [41] Wu Fuyuan, Jahn B M, Wilde SA, et al. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis[J]. Lithos, 2003, 66(3–4): 241–273.
- [42] 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.
- [43] Batchelor R A and Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. Chemical Gology, 1985, 48(1–4): 43–45.
- [44] Harris N B W, Inger S. Trace element modeling of pelitederived granites[J]. Contrib. Mineral. Petrology, 1992, 110: 46–56.
- [45] Song Shuguang, Niu Yaoling, Zhang Lifei, et al. Tectonic evolution of early Paleozoic HP metamorphic rocks in the North Qilian Mountains, NW China: New perspectives[J]. Journal of Asian Earth Science, 2009, 16(2): 285–293.
- [46] Xu Yajun, Du Yuansheng, Cawood P A, et al. Detrital zircon record of continental collision: Assembly of the Qilian Orogen, China[J]. Sedimentary Geology, 2010, 230: 35–45.
- [47] Liu Yajun, Neubauer F, Genser J, et al. ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of blueschist facies Delitic schists from Qingshuigou in the Northern Qilian Mountains, western China[J]. Island Arc, 2006, 15(1): 187–198.
- [48] Xu Yajun, Du Yuansheng, Cawood P A, et al. Provenance record of a foreland basin: Detrital zircon U-Pb ages from Devonian strata in the North Qilian Orogenic Belt, China[J]. Tectonophysics, 2010, 495(3/4): 337–347.
- [49] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山奥陶纪弧后盆地火山岩成因[J]. 中国地质, 2003, 30(1): 48–60.
Xia linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi. Magmagenesis of Ordovician back-arc basins in the Northern Qilian Mountains[J]. Geology in China, 2003, 30(1): 48–60(in Chinese with English abstract).