

文章编号: 1000-4734(2022)03-0257-13

滇东南老君山矿集区马卡钨铍稀有金属矿床 花岗岩年代学归属

杜胜江^{1,2}, 温汉捷^{3,4*}, 张锦让⁵, 秦朝建⁶, 罗重光⁶

(1. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 贵州省地质调查院, 贵州 贵阳 550005;
3. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 4. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049; 5. 西南石油大学
地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 6. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 滇东南地区处于扬子板块和华夏板块交汇处, 该区地质活动频繁、成矿条件优越, 分布有个旧岩体、薄竹山岩体、老君山岩体, 并伴随形成了以个旧锡矿床、白牛厂银多金属矿床、都龙锡锌矿床为代表的大型-超大型矿床, 构成了我国重要的滇东南钨锡多金属成矿带。马卡钨铍多金属矿床分布于老君山岩体北缘, 位于重要的滇东南成矿带上, 该矿床与区内的马卡花岗岩成因上具有密切联系。本文通过对马卡花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年代学开展了系统研究, 探讨了该花岗岩的形成年龄、物质来源等。结果显示, 马卡花岗岩年龄位于 400~415 Ma 之间, 表明其形成于加里东期, 应归属于加里东期的南温河系列花岗岩系列, 而不是燕山期老君山花岗岩的组成部分。马卡花岗岩具有高硅 ($w(\text{SiO}_2)=72.47\% \sim 74.63\%$)、高碱 ($w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})=7.02\% \sim 7.79\%$)、高钾 ($w(\text{K}_2\text{O}) > w(\text{Na}_2\text{O})$)、强过铝质 ($I_A/I_{\text{CNK}} > 1.11$) 等特征, Y、Th 与 Rb 演化趋势表明其应为 S 型花岗岩, 综合分析, 其原岩可能主要为富粘土的泥质来源。

关键词: 锆石 U-Pb 定年; 马卡花岗岩; 南温河系列花岗岩; 老君山矿集区

中图分类号: P618.72; P597

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2022.42.022

第一作者: 杜胜江, 男, 1986 年生, 高级工程师, 博士后, 主要从事矿床学研究. E-mail: shengjiangdu@163.com

A study on isotopic chronology of granites in the Maka W-Be polymetallic deposit of the Laojunshan ore-concentrated district, SE Yunnan, China

DU Sheng-jiang^{1,2}, WEN Han-jie^{3,4*}, ZHANG Jin-rang⁵, QIN Chao-jian⁶, LUO Chong-guang⁶

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
2. Guizhou Geological Survey, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Guiyang 550005, China; 3. College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China;
4. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
5. College of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 6. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract: The Laojunshan ore-concentrated district, SE Yunnan, China, is located in the conjunction area of the Yangtze Block and Cathaysian Block. In this special geotectonic area, owing to recurrent geologic activities and excellent ore-forming conditions, the Gejiu, Bozhushan and Laojunshan intrusions were emplaced and a series of super-large ore deposits including representatives of the Gejiu tin deposit, the Bainiuchang silver-polymetallic deposit, and the Dulong tin-zinc polymetallic deposits were formed in association with those intrusions. These deposits constituted the SE Yunnan

收稿日期: 2021-06-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 41962005; 41903038; 42073019); 国家重点研发计划项目 (编号: 2017YFC0602500)

* 通讯作者, E-mail: wenhanjie@vip.gyig.ac.cn

polymetallic tungsten-tin metallogenic belt which is an important one in China. The Maka tungsten-beryllium polymetallic deposit is located in the northern contact zone of the Laojunshan intrusion within the important SE Yunnan metallogenic belt. Its metallogenesis may be closely related to the Maka granite. In this study, we have carried out a systematical chronological study by using the LA-ICP-MS zircon U-Pb dating to discuss the formation age and materials sources of the Maka granite. The results show that the zircon U-Pb ages vary from 400 Ma to 415 Ma, indicating that the Maka granite body was emplaced in the Caledonian rather than the Yanshanian and it should belong to a part of the Caledonian Nanwenhe granite series rather than a part of the Yanshanian Laojunshan granite body. Additionally, the Maka granite samples are featured with high-silicon ($w(\text{SiO}_2)=72.47\% - 74.63\%$), high-alkali ($w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})=7.02\% - 7.79\%$), high-potassium ($w(\text{K}_2\text{O})>w(\text{Na}_2\text{O})$), and strong peraluminous granite ($I_A/I_{\text{CNK}}>1.11$). Evolutionary trends of Y, Th, and Rb show that the Maka granite should belong to the S-type granite and could be derived from the remelt of clay-enriched argillaceous rocks.

Keywords: Zircon U-Pb dating; the Maka granite; the Nanwenhe granite series; the Laojunshan ore-concentrated district

钨、铍均属于重要的关键金属，钨铍多金属矿床在战略关键金属矿产资源中占有举足轻重的位置，对国家资源安全起着极其重要的作用^[1]，在国际关键金属资源紧缺的局势下，开展钨铍关键金属成岩-成矿规律相关的研究很有必要。

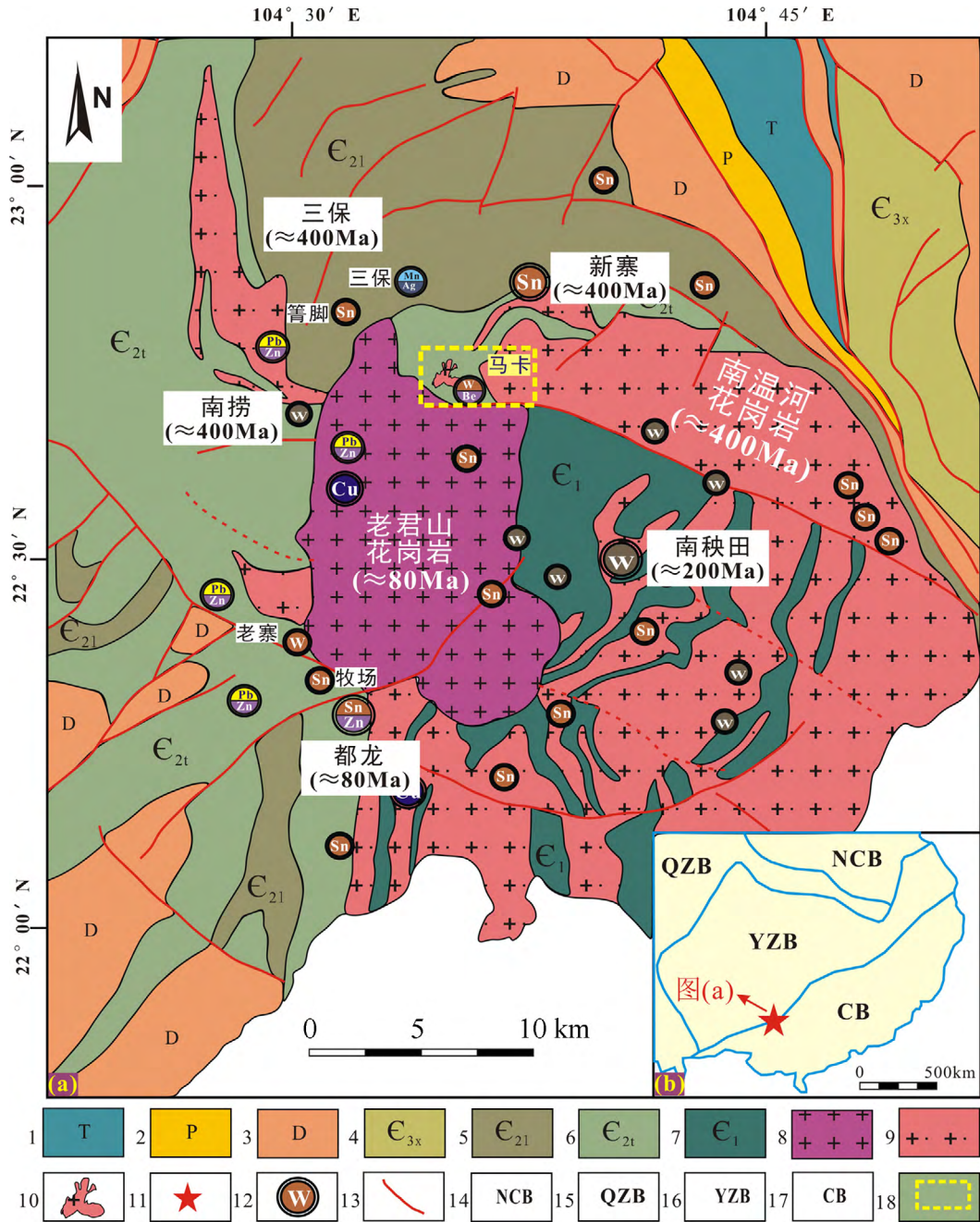
马卡矿床位于滇东南钨锡多金属成矿带，除产钨外，还伴生有重要的稀有金属铍。其中，钨资源量达到了中—大型规模。为深入揭示马卡钨铍成矿规律，开展同位素年代学至关重要。前人对马卡矿床附近的钨锡矿床开展过一些研究工作，如王大鹏等^[2]和刀学强等^[3]报道了马卡西部的南捞钨矿床白钨矿 Sm-Nd 年龄为 411~445 Ma，与北部新寨锡矿床的成矿年龄（419 Ma）^[4]在误差范围内一致，初步表明南捞钨矿床和新寨锡床同形成于加里东期，可能与加里东期南温河花岗岩有关。Du 等^[5]对马卡西北部的三保锰银矿床开展年代学研究，获得与硬锰矿（主要载 Ag 矿物）共生的锡石原位 U-Pb 年龄为 436 Ma，也显示了加里东期的成矿信息。此外，菱锰矿和共生方解石的碳氧同位素特征（-7.0‰~-2.4‰）也反映该矿床的成矿作用可能与岩浆热液有关^[6]。马卡花岗岩由于空间上距离老君山岩体较近，根据其野外宏观地质特征，长期被认为是燕山期老君山岩体的组成部分^[7]。因此，精确的成岩年代学研究对深入揭示成矿规律显得至关重要。

我们通过系统的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年，获得了马卡花岗岩年龄位于 400~415 Ma，表明为加里东期岩浆活动产物。根据老君山矿集区主要分布有燕山期老君山系列花岗岩^[8-11]和加里东期南温河系列花岗岩^[12-13]，我们认为马卡花岗岩应归属于南温河系列花岗岩，而并非老君山花岗岩的组成部分。结合前人报道的马卡附近钨锡矿床显示有加里东期成矿这一重要信息，认为马卡花岗岩年代学研究工作，有望能为揭示加里东期成岩-成矿作用提供年代学依据，同时对深刻认识老君山矿集区加里东期成矿作用及加里东期矿床勘探起到巨大的推动作用。

1 地质背景和矿床地质特征

滇东南地区处于扬子板块和华夏板块交汇处^[14-15]，该区地质活动频繁、成矿条件优越，平行哀牢山构造带方向，依次分布有个旧岩体、薄竹山岩体、老君山岩体，并伴随有大型-超大型矿床，包括个旧锡矿床、白牛厂银多金属矿床、都龙锡锌矿床^[16]，构成了我国重要的滇东南钨锡多金属成矿带。老君山矿集区属于滇东南成矿带的重要组成部分，经历了多期次的构造热事件以及沉积作用、岩浆作用、变质作用，形成了构造复杂、岩性多样的地质特征（图 1）。岩浆活动强烈，主要发育分布有加里东期南温河系列花岗岩和燕山期老君山系列花岗岩，并伴随形成了以新寨大型锡矿、南秧超大型田钨矿、都龙超大型锡锌矿为代表的 W-Sn-Pb-Zn-Cu-稀有-稀散多金属矿集区（图 1a）。由于该矿集区矿床繁多、矿种丰富，逐渐备受关注^[10,17-25]。

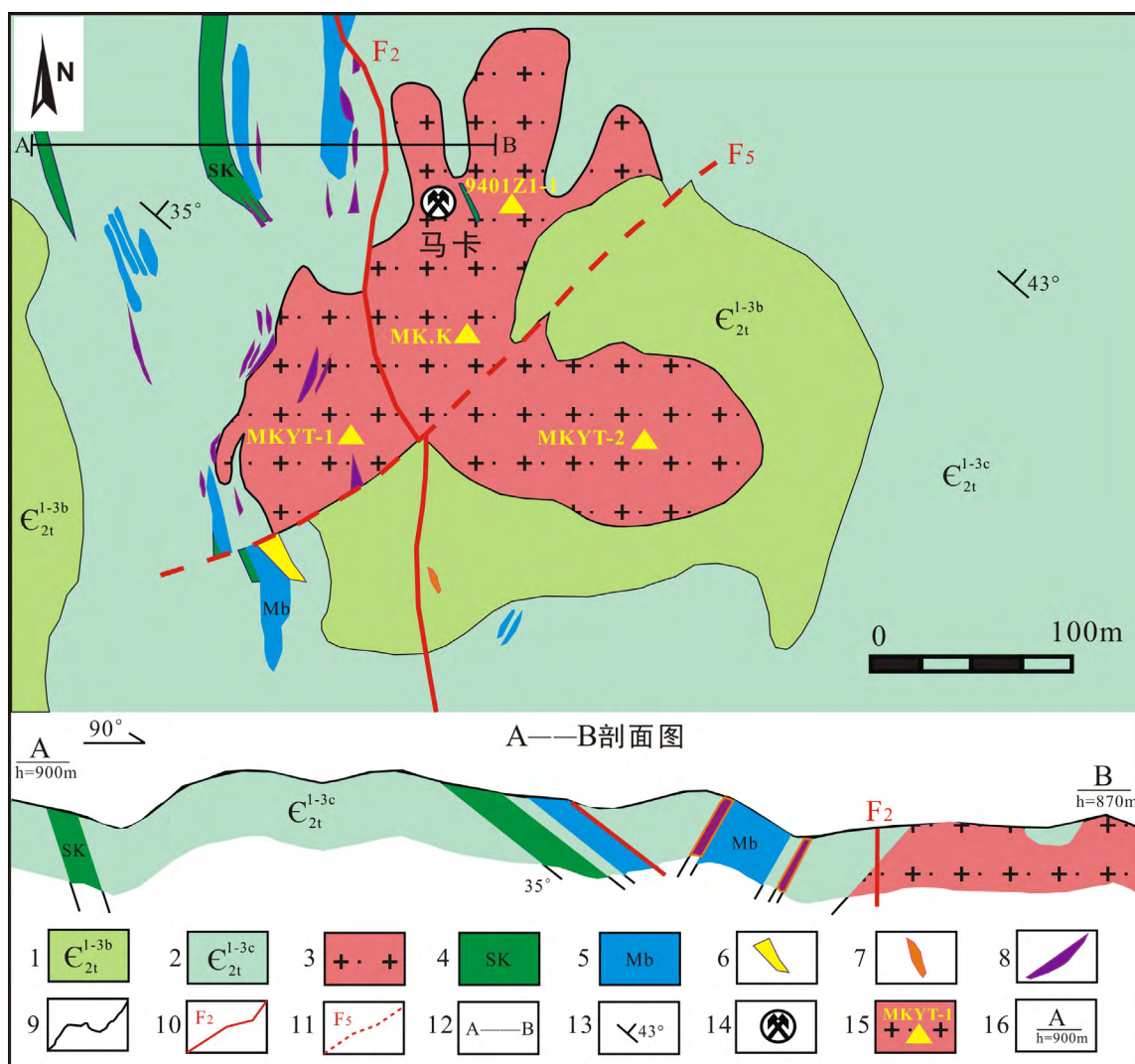
马卡钨铍稀有多金属矿床位于老君山岩体北缘, 南临老君山岩体外接触带边缘约 1 km, 北靠马卡花岗岩 (图 1)。根据云南麻栗坡县马卡天银丰矿业公司相关资料, 据不完全统计, 马卡矿区内分布的钨铍/铅锌矿多金属矿体至少 20 余个, 其中大部分均为规模较大的矿体。WO₃ 平均含量普遍为 0.7% 左右, 超过钨矿床工业品位 (0.2%, 《钨、锡、汞、锑矿产地地质勘探规范 DZ/T0201-2002》), 伴生的铍资源含量 w(BeO) 一般在 0.3% 左右, 主要的赋铍矿物为日光榴石^[26-27], 达到了铍矿床的工业品位 (0.1%, 《稀有金属矿产地地质勘探规范 DZ/T0203-2002》), 初步预测, 钨资源量达到了中-大型规模。



1-三叠系泥岩和凝灰岩, 2-二叠系硅质岩和泥岩, 3-泥盆系碳酸盐岩, 4-上寒武统歇场组白云质灰岩, 5-中寒武统龙哈组白云岩, 6-中寒武统田蓬组白云质灰岩, 7-下寒武统片岩和片麻岩, 8-老君山花岗岩, 9-南温河花岗岩, 10-马卡花岗岩, 11-研究区大地构造位置, 12-矿床 (点), 13-断层, 14-华北板块, 15-青藏板块, 16-扬子板块, 17-华夏板块, 18-重点研究区

图 1 滇东南老君山矿集区地质图 (据文献[4, 12, 19]修编)
Fig. 1. Geologic map for the Laojunshan ore-concentrated district.

马卡矿区内主要分布有马卡花岗岩(图2),在9401坑道内,白钨矿主要产于石英脉中,以石英脉型钨矿化为主,矽卡岩型钨矿化未被发现。出露地层主要有早古生代中寒武统田蓬组和龙哈组,其中田蓬组为主要的赋矿层位,岩性以片岩和大理岩为主,根据不同的岩性组合,田蓬组可划分为5个亚段;龙哈组为一套灰色薄-中层状的大理岩、大理岩化灰岩。区内断裂较发育,主要分布有南北向的 F_2 断裂和推测的近东北方向延伸 F_5 断裂(图2),同时伴随有大量的次级断层,可能是成矿流体运移、矿物质沉淀的良好通道和容矿空间。变质岩类除片岩和大理岩外,还分布有似层状、层状矽卡岩,以及少量的角岩。区内断裂发育,走向以北东向为主,同时伴随有大量次级断层,为成矿流体的运移和沉淀提供了很好的容矿空间。矿物种类繁多,金属矿物主要有白钨矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黄铁矿、日光榴石等,还含少量的毒砂。脉石矿物以石英、萤石、云母、方解石、透辉石、透闪石、石榴子石、阳起石为主,其次还含有绿帘石、绿泥石等。主要的围岩蚀变类型有硅化、萤石化、矽卡岩化等。其中野外发现与白钨矿密切共生矿物除石英外,还有锰方解石和萤石。



1-寒武系田蓬组第二段第三层中部,2-寒武系田蓬组第二段第三层上部,3-马卡花岗岩,4-矽卡岩,5-大理岩,6-片岩,7-角岩,8-矿体,9-地质界线,10-断层,11-推测断层,12-剖面线及编号,13-产状,14-马卡工作区,15-采样位置及样品编号,16-剖面起/终点及高程

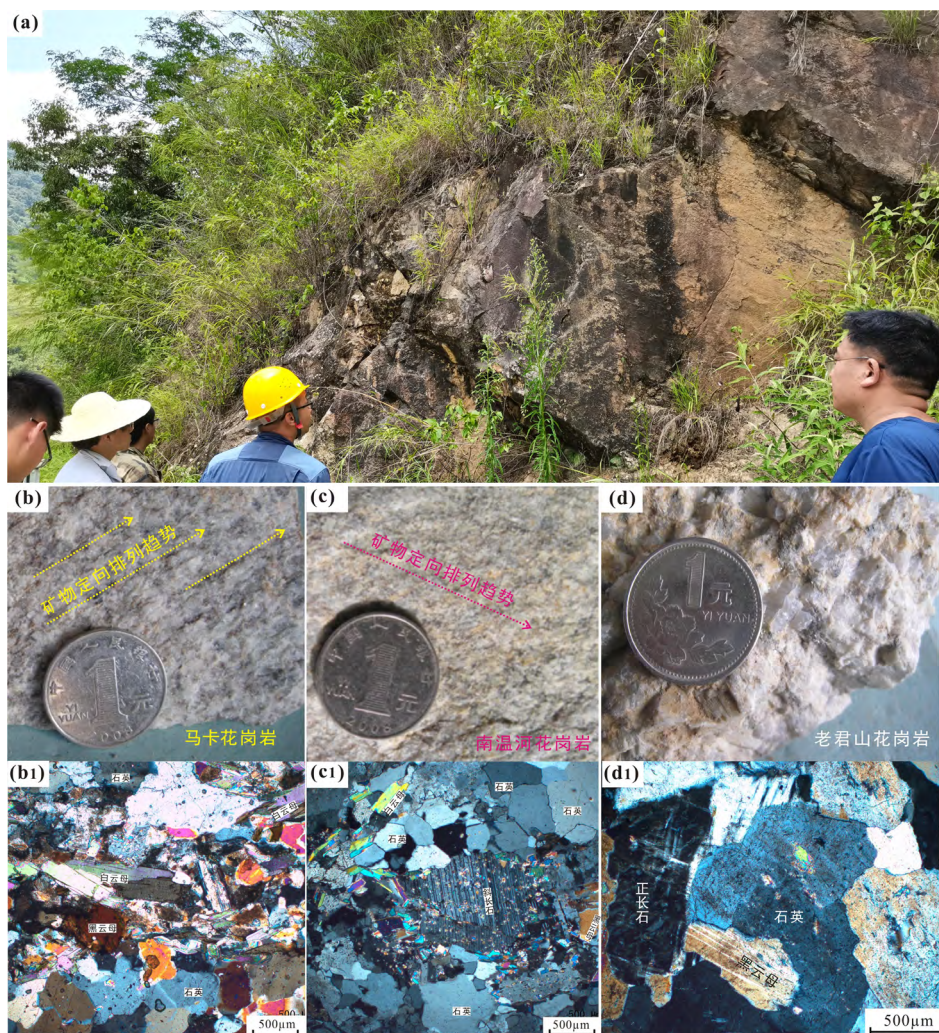
图2 老君山矿集区马卡钨铍多金属矿床地质图和剖面图以及采样位置(据文献[7,27]修编)

Fig. 2. Geologic map and cross section for the Maka tungsten-beryllium polymetallic deposit in the Laojunshan ore-concentrated district.

2 样品采集及分析方法

2.1 样品采集

马卡花岗岩出露于老君山岩体北缘, 平面形态呈不规则状锯齿状展布 (图 2), 侵位于寒武纪田蓬组地层之中, 接触面不平整, 大部分波状起伏。岩性主要为二云母片麻状细粒花岗岩、白云母花岗岩、黑云母花岗片麻岩和条痕状花岗片麻岩等。空间上, 具有片麻状构造的花岗岩离钨矿体较近。为了系统开展马卡花岗岩与区内主要的 2 期花岗岩 (燕山期老君山系列花岗岩和加里东期南温河系列花岗岩) 的显微特征对比研究, 本文采集的马卡花岗岩样品 (图 3a), 既包括了坑道样 (9401Z1-1), 也包括了地表样 (MK.K、MKYT-1、MKYT-2), 分布于马卡矿区不同的位置 (图 2), 能很好地反映出马卡花岗岩整体地质特征。通过详细的显微特征对比研究, 表明马卡花岗岩和南温河花岗岩均具有片麻状构造, 略显矿物定向排列趋势 (图 3b, b1), 与南温河系列花岗岩特征相似 (图 3c, c1), 而与粗粒状且矿物无定向的老君山花岗岩特征不同 (图 3d, d1)



a. 采集样品现场; b 和 b1. 马卡花岗岩宏观和微观显微特征;

c 和 c1. 南温河花岗岩宏观和微观显微特征; d 和 d1. 老君山花岗岩宏观和微观显微特征

图 3 马卡花岗岩野外采集以及显微特征对比

Fig. 3. Photos for field sampling and specimens and comparison of microscopic features of specimens from the Maka granite body.

2.2 分析方法

首先,对野外采集的马卡花岗岩样品清洗干净、晾干,再粉碎至合适的粒径,经过用水粗淘、强磁分选、电磁分选和用酒精细淘之后,在实体显微镜下手工挑选出锆石,多数以长柱状为主,内部结构清晰,绝大多数结晶较好,具有典型的岩浆震荡环带特征(图4),指示其主体为岩浆结晶的产物。

然后,将挑好的锆石送往中国地质科学院北京离子探针中心进行锆石制靶、显微镜照相、阴极发光照相(CL),检查锆石内部结构,避开裂隙和包裹体,圈出较好的锆石区域以备测试。

最后,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测定,其中3件样品(MK. K、MKYT-1、MKYT-2)在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,另外1件样品(MK.K)在天津地质矿产研究所完成。西北大学大陆动力学国家重点实验室所采用的电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)为美国 Agilent 公司生产的 Agilent 7500a;激光剥蚀系统(LA)为德国 Lambda Physik AG 公司生产的 GeoLas 2005,该系统由德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102ArF 准分子激光器(波长 193 nm, 200 mJ 的最大能量和 20 Hz 的最大脉冲速率)与 MicroLas 公司的光学系统组成,氦气作为载气。天津地质矿产研究所同位素实验室所利用的激光剥蚀系统和相关仪器配置和测试流程参见相关文献^[28]。实验数据的处理及作图详细步骤参见相关文献^[29-32]。

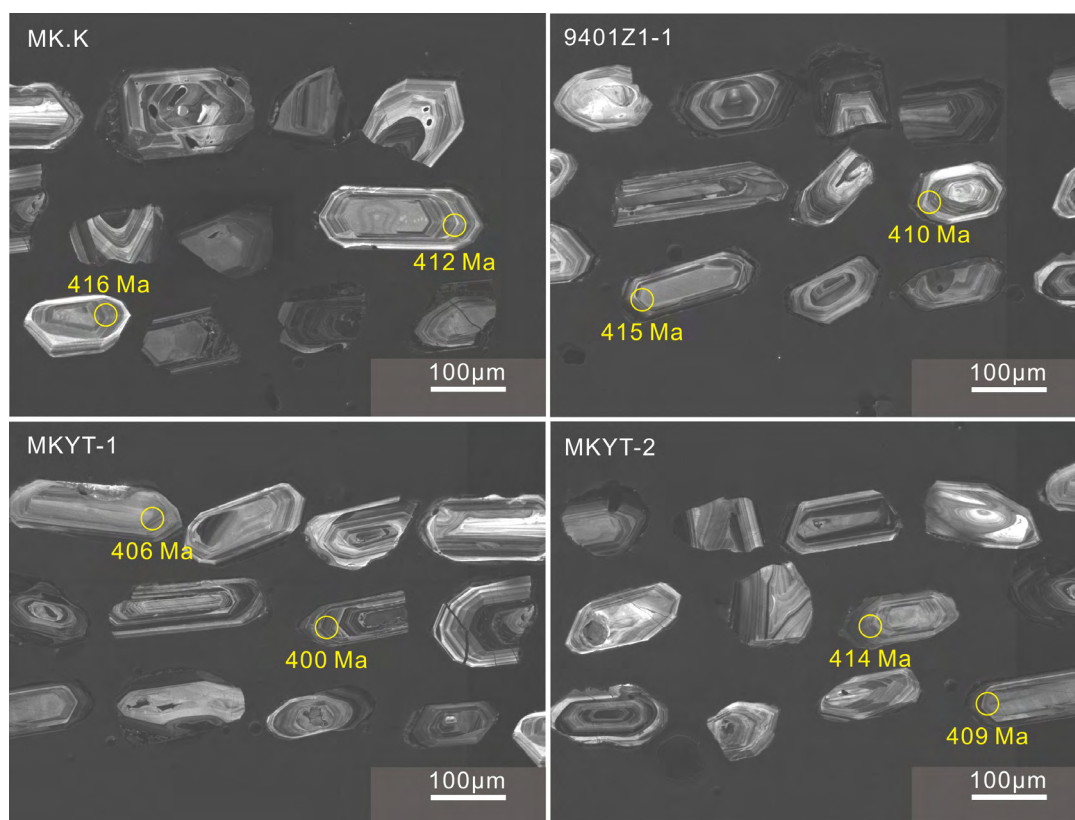


图4 马卡花岗岩部分锆石 CL 图像及年龄

Fig. 4. CL images and ages of parts of zircon grains from the Maka granite body.

3 结果

3.1 全岩主量元素和微量元素

本文对老君山矿集区北缘马卡矿床内的马卡花岗岩主量元素和微量元素进行了系统测试,结果见表1,显示马卡花岗岩具有高硅、高碱、高钾特征,也具有过铝质花岗岩特征。

表 1 老君山矿集区马卡花岗岩主量元素、微量元素测试结果

Table 1. Analytical results of major and trace elements of samples from the Maka granite in the Laojunshan district

样品	w _B /%											I _A /I _{CNK}	σ	w _B /10 ⁻⁶					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	LOI			Total	Rb	Sr	Y	Ba	Th
MKYT-1	74.63	13.19	1.23	0.26	0.41	1.13	6.63	0.14	0.04	0.17	1.25	99.08	1.38	1.90	550	27.1	11.9	170	10.8
9401Z1-1	73.61	13.72	1.81	0.50	0.30	2.67	5.12	0.15	0.07	0.20	1.59	99.74	1.26	1.98	421	42.0	17.8	180	10.4
9401Z2YT-3	73.61	13.48	2.48	0.47	0.40	1.07	6.10	0.13	0.12	0.20	2.57	99.49	1.46	1.74	600	34.0	17.5	180	9.90
MKYT-1	73.74	13.44	1.63	0.44	0.39	1.64	5.38	0.12	0.10	0.19	2.78	99.85	1.44	1.60	449	47.8	18.1	210	8.80

注: ①LOI 代表烧失量; ②里特曼指数 $\sigma = [w(K_2O) + w(Na_2O)]^2 / [w(SiO_2) - 43]$; ③ $I_A/I_{CNK} = n(Al_2O_3) / [n(CaO) + n(Na_2O) + n(K_2O)]$.

3.2 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年

对马卡花岗岩开展了系统的 U-Pb 年代学研究, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素比值测试数据见表 2, 对应的锆石年龄见图 5。其中, 样品 MK.K 分析了 43 个点, 去除偏离谐和线的 2 个点后剩余 41 个点的加权平均年龄为(415.6±1.8) Ma; 样品 9401Z1-1 分析了 30 个点, 去除偏离谐和线的 7 个点后剩余 23 个点的加权平均年龄为(411.2±3.5) Ma; 样品 MKYT-1 分析了 36 个点, 去除偏离谐和线的 13 个点后剩余 23 个点的加权平均年龄为(400.7±3.0) Ma; 样品 MKYT-2 分析了 29 个点, 去除偏离谐和线的 11 个点后剩余 19 个点的加权平均年龄为(408.6±5.8) Ma。其中样品 MK.K 测试在天津地质矿产研究所完成, 另外 3 件样品(9401Z1-1、MKYT-1、MKYT-2)测试在西北大学完成。从 2 个不同的测试单位获得的年龄结果误差范围内是一致的, 表明马卡花岗岩侵位于加里东期。

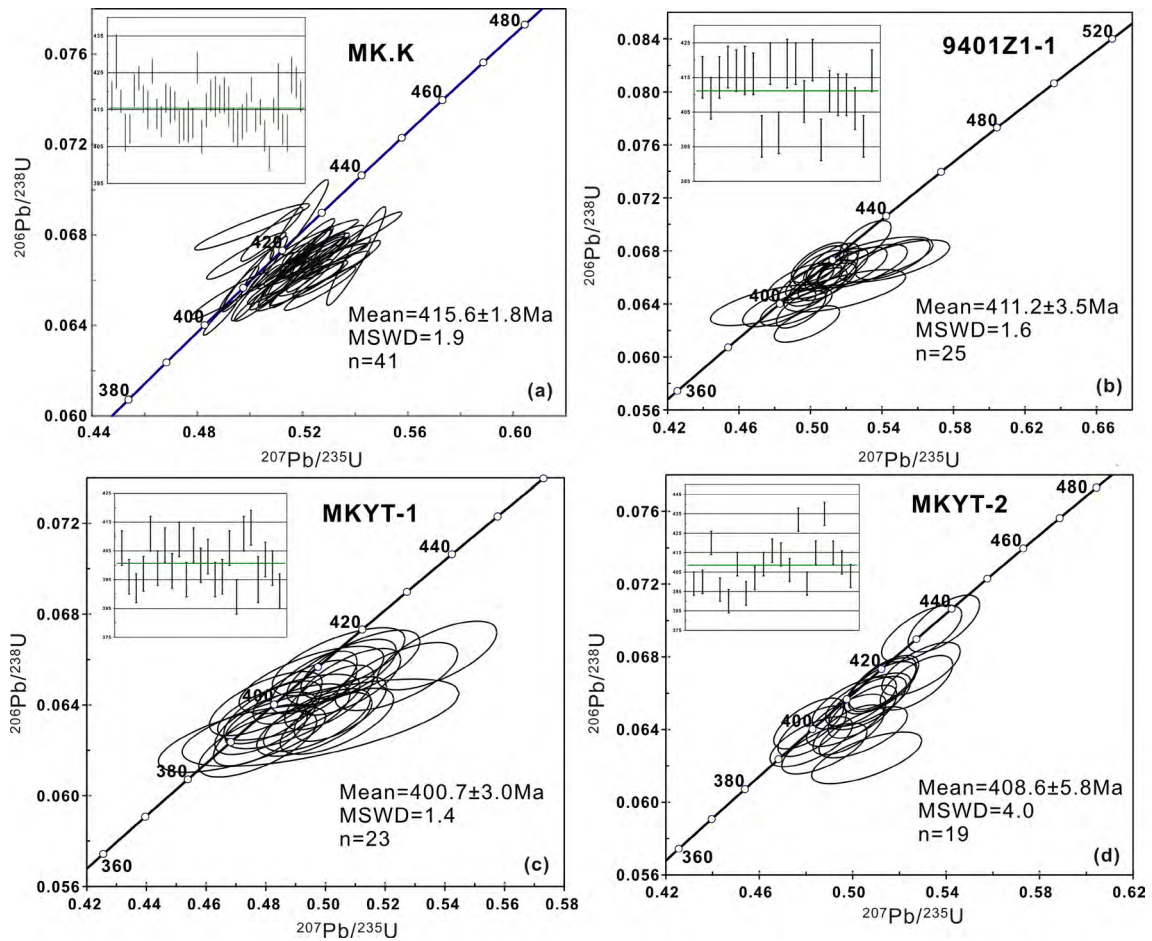


图 5 马卡花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5. Zircon U-Pb concordia diagrams for samples from the Maka granite.

表 2 马卡花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素比值测试数据

Table 2. The LA-ICP-MS U-Pb dating results of zircon grains from samples in the Maka granite

点号	$w_B/10^{-6}$			同位素比值						年龄/Ma					
	U	Th	Pb	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
MK.K.1	485	93	32	0.0567	0.001	0.5242	0.009	0.0671	0.0006	478	38	428	7	419	4
MK.K.2	844	100	56	0.0548	0.0008	0.5187	0.0073	0.0687	0.0012	404	33	424	6	428	7
MK.K.3	402	56	26	0.0572	0.0012	0.5278	0.0112	0.0669	0.0005	501	46	430	9	417	3
MK.K.4	1058	221	68	0.0557	0.0006	0.5026	0.0063	0.0655	0.0008	440	25	413	5	409	5
MK.K.5	569	77	36	0.0582	0.001	0.5266	0.009	0.0656	0.0006	537	37	430	7	410	4
MK.K.6	1142	108	73	0.0564	0.0006	0.5235	0.0054	0.0673	0.0007	468	22	428	4	420	4
MK.K.7	558	85	37	0.0563	0.001	0.5267	0.0096	0.0679	0.0005	463	39	430	8	423	3
MK.K.8	605	96	39	0.0568	0.0009	0.5242	0.0083	0.067	0.0006	483	34	428	7	418	4
MK.K.9	482	78	31	0.0581	0.0011	0.5329	0.011	0.0665	0.0008	535	41	434	9	415	5
MK.K.10	562	81	37	0.058	0.0008	0.5457	0.0079	0.0682	0.0005	531	30	442	6	425	3
MK.K.11	348	66	22	0.0578	0.0013	0.5281	0.0114	0.0663	0.0007	521	48	431	9	414	4
MK.K.12	441	78	28	0.0564	0.001	0.5128	0.0091	0.066	0.0007	467	40	420	7	412	4
MK.K.13	417	227	30	0.0567	0.0009	0.5234	0.0083	0.067	0.0006	478	34	427	7	418	4
MK.K.14	547	81	35	0.0572	0.0008	0.5259	0.0079	0.0667	0.0008	499	33	429	6	416	5
MK.K.15	616	86	39	0.0557	0.0008	0.5117	0.0073	0.0667	0.0006	440	30	420	6	416	4
MK.K.16	363	59	23	0.0573	0.0012	0.519	0.011	0.0657	0.0007	502	46	424	9	410	4
MK.K.17	894	90	56	0.0572	0.0008	0.5195	0.0079	0.0659	0.0007	500	33	425	6	411	4
MK.K.18	830	129	52	0.0549	0.0006	0.4992	0.0065	0.066	0.0009	408	26	411	5	412	6
MK.K.19	470	91	30	0.0575	0.001	0.5223	0.0098	0.0659	0.0007	511	40	427	8	411	4
MK.K.20	223	45	15	0.0531	0.0014	0.5008	0.0144	0.0684	0.0007	334	60	412	12	426	4
MK.K.21	513	88	32	0.0562	0.0009	0.5062	0.008	0.0653	0.0007	462	34	416	7	408	4
MK.K.22	454	113	30	0.0567	0.0009	0.5197	0.0093	0.0664	0.0007	481	36	425	8	415	5
MK.K.23	447	68	29	0.0566	0.0009	0.5237	0.0082	0.0671	0.0007	476	34	428	7	419	4
MK.K.24	304	84	20	0.0567	0.0013	0.5244	0.0125	0.0671	0.0009	479	50	428	10	419	
MK.K.25	533	115	35	0.0577	0.0009	0.5329	0.0086	0.067	0.0006	519	35	434	7	418	4
MK.K.26	1145	90	72	0.0565	0.0006	0.5229	0.0052	0.0671	0.0008	472	23	427	4	419	5
MK.K.27	1021	104	64	0.055	0.0005	0.5055	0.0058	0.0666	0.0009	413	22	415	5	416	5
MK.K.28	573	87	36	0.0563	0.0008	0.5113	0.0075	0.0658	0.0007	466	31	419	6	411	5
MK.K.30	769	81	48	0.0563	0.0007	0.5121	0.0059	0.0659	0.0008	465	26	420	5	412	5
MK.K.31	1036	116	65	0.0563	0.0006	0.5152	0.006	0.0664	0.0008	464	25	422	5	414	5
MK.K.32	771	90	49	0.0562	0.0007	0.522	0.0061	0.0674	0.0005	459	26	427	5	421	3
MK.K.33	1694	977	119	0.0563	0.0005	0.5125	0.0053	0.066	0.0005	463	21	420	4	412	3
MK.K.34	870	176	56	0.0555	0.0006	0.508	0.0055	0.0664	0.0006	433	24	417	5	414	4
MK.K.35	375	60	24	0.0547	0.0011	0.4923	0.0097	0.0653	0.0007	399	44	406	8	408	4
MK.K.36	2001	151	121	0.0551	0.0004	0.4887	0.0042	0.0644	0.0005	415	18	404	3	402	3
MK.K.37	718	99	45	0.056	0.0007	0.5127	0.0064	0.0664	0.0005	451	27	420	5	415	3
MK.K.38	899	91	58	0.0584	0.0007	0.5404	0.0074	0.0671	0.0014	546	27	439	6	419	9
MK.K.39	1577	88	96	0.0548	0.0005	0.4959	0.005	0.0656	0.0007	404	20	409	4	410	4
MK.K.41	1125	120	73	0.0542	0.0009	0.5083	0.0078	0.068	0.0008	379	36	417	6	424	5
MK.K.42	886	86	57	0.0559	0.0007	0.5223	0.0066	0.0677	0.0007	450	27	427	5	422	4
MK.K.43	664	89	43	0.0539	0.001	0.4987	0.01	0.0671	0.0007	368	42	411	8	419	4
9401Z1-1.02	680	141	51	0.0559	0.0018	0.5118	0.0098	0.0665	0.001	446	20	420	7	415	6
9401Z1-1.03	1094	163	83	0.0553	0.0016	0.5001	0.0119	0.0656	0.001	425	64	412	8	409	6
9401Z1-1.04	1206	202	91	0.055	0.0019	0.5047	0.0107	0.0665	0.001	413	23	415	7	415	6
9401Z1-1.05	1092	73	80	0.0554	0.0018	0.5125	0.0098	0.0671	0.001	429	20	420	7	418	6
9401Z1-1.06	747	103	56	0.0547	0.0018	0.5045	0.0094	0.0669	0.001	400	19	415	6	417	6
9401Z1-1.07	877	96	66	0.056	0.0018	0.5306	0.0096	0.0688	0.001	451	18	432	6	429	6
9401Z1-1.08	987	117	73	0.0574	0.0024	0.5293	0.0165	0.0669	0.0011	507	41	431	11	417	7
9401Z1-1.10	1035	93	76	0.056	0.0015	0.5154	0.0112	0.0667	0.001	453	59	422	8	416	6
9401Z1-1.11	545	60	39	0.0549	0.0018	0.4826	0.0136	0.0637	0.001	409	73	400	9	398	6
9401Z1-1.12	829	469	71	0.059	0.0024	0.5471	0.0204	0.0672	0.0011	568	90	443	13	419	6
9401Z1-1.13	585	90	47	0.0541	0.0026	0.4768	0.0216	0.0639	0.001	375	111	396	15	399	6

续表 2

点号	$w_B/0^6$			同位素比值						年龄/Ma					
	U	Th	Pb	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
9401Z1-1.15	732	68	54	0.0574	0.0031	0.5324	0.0239	0.0672	0.0012	508	67	433	16	419	7
9401Z1-1.16	843	90	62	0.0546	0.0019	0.5053	0.0106	0.0671	0.001	396	23	415	7	419	6
9401Z1-1.18	1030	89	74	0.056	0.0015	0.5039	0.0111	0.0653	0.001	451	60	414	7	408	6
9401Z1-1.20	1302	98	99	0.0588	0.0017	0.5461	0.0138	0.0674	0.001	559	65	442	9	420	6
9401Z1-1.22	1123	76	80	0.0578	0.0016	0.498	0.0121	0.0625	0.0009	522	64	410	8	391	6
9401Z1-1.23	1846	101	125	0.0564	0.0019	0.4948	0.0092	0.0636	0.0009	469	19	408	6	397	6
9401Z1-1.25	509	68	37	0.0557	0.0017	0.506	0.0131	0.0659	0.001	441	68	416	9	411	6
9401Z1-1.26	814	81	60	0.0546	0.0016	0.4945	0.0123	0.0656	0.001	397	66	408	8	410	6
9401Z1-1.27	1699	113	122	0.0562	0.0014	0.5093	0.0107	0.0657	0.0009	462	58	418	7	410	6
9401Z1-1.28	1046	99	81	0.058	0.0027	0.5193	0.0225	0.065	0.0011	528	104	425	15	406	6
9401Z1-1.29	665	113	47	0.056	0.0017	0.492	0.0133	0.0638	0.0009	451	70	406	9	398	6
9401Z1-1.30	703	108	51	0.0569	0.0021	0.5233	0.013	0.0668	0.001	486	29	427	9	417	6
MKYT-1.01	1947	158	142	0.0554	0.0013	0.4962	0.0095	0.065	0.0009	427	54	409	6	406	6
MKYT-1.03	671	67	49	0.0569	0.0016	0.4972	0.0118	0.0633	0.0009	489	63	410	8	396	6
MKYT-1.04	724	69	51	0.0554	0.0014	0.4782	0.0104	0.0627	0.0009	426	59	397	7	392	5
MKYT-1.06	656	96	48	0.0557	0.0018	0.4873	0.0138	0.0635	0.0009	439	73	403	9	397	6
MKYT-1.07	525	75	39	0.0555	0.0018	0.5044	0.0147	0.0659	0.001	433	75	415	10	411	6
MKYT-1.10	370	78	28	0.0554	0.002	0.4877	0.0158	0.0639	0.001	427	81	403	11	399	6
MKYT-1.11	525	138	40	0.0552	0.002	0.4953	0.016	0.0651	0.001	420	82	409	11	407	6
MKYT-1.14	982	94	69	0.055	0.0015	0.4824	0.0108	0.0637	0.0009	410	61	400	7	398	6
MKYT-1.15	733	112	54	0.056	0.0016	0.5054	0.0121	0.0655	0.001	453	64	415	8	409	6
MKYT-1.16	929	84	65	0.057	0.0017	0.4963	0.0128	0.0632	0.0009	492	67	409	9	395	6
MKYT-1.17	500	65	36	0.0582	0.0022	0.5238	0.0136	0.0653	0.001	538	31	428	9	407	6
MKYT-1.19	2124	68	157	0.0543	0.0016	0.48	0.0125	0.0641	0.0009	385	69	398	9	400	6
MKYT-1.21	787	82	56	0.0554	0.0015	0.4932	0.0115	0.0646	0.0009	428	63	407	8	403	6
MKYT-1.22	2163	63	149	0.0551	0.0015	0.48	0.0113	0.0632	0.0009	416	63	398	8	395	6
MKYT-1.24	574	236	44	0.0578	0.0021	0.5039	0.0126	0.0633	0.001	520	29	414	8	396	6
MKYT-1.26	814	128	58	0.0567	0.002	0.5078	0.0115	0.065	0.001	478	26	417	8	406	6
MKYT-1.28	1096	70	73	0.0556	0.0022	0.4774	0.0131	0.0623	0.001	436	34	396	9	389	6
MKYT-1.29	458	88	33	0.0564	0.0021	0.5117	0.0132	0.0658	0.001	469	31	420	9	411	6
MKYT-1.31	342	75	25	0.0589	0.0022	0.5374	0.0133	0.0662	0.001	563	29	437	9	413	6
MKYT-1.32	825	63	57	0.0572	0.0037	0.4984	0.0307	0.0632	0.0013	498	147	411	21	395	8
MKYT-1.34	1856	126	127	0.0565	0.0019	0.5013	0.0099	0.0643	0.0009	473	21	413	7	402	6
MKYT-1.35	574	81	40	0.0574	0.002	0.505	0.0102	0.0638	0.0009	507	21	415	7	399	6
MKYT-1.36	292	112	22	0.0548	0.0023	0.4721	0.0186	0.0625	0.001	403	97	393	13	391	6
MKYT-2.01	878	68	63	0.0573	0.0017	0.5045	0.0125	0.0639	0.0009	503	65	415	8	399	6
MKYT-2.03	1220	80	86	0.0565	0.0014	0.4982	0.01	0.064	0.0009	471	56	411	7	400	6
MKYT-2.05	637	57	47	0.057	0.0015	0.5293	0.0111	0.0673	0.001	492	57	431	7	420	6
MKYT-2.06	751	83	53	0.0552	0.0016	0.4823	0.0117	0.0633	0.0009	422	64	400	8	396	6
MKYT-2.07	437	66	33	0.0588	0.002	0.5061	0.0156	0.0624	0.0009	559	76	416	11	390	6
MKYT-2.09	1103	78	78	0.0561	0.002	0.5065	0.011	0.0655	0.001	456	24	416	7	409	6
MKYT-2.10	556	75	39	0.0562	0.0016	0.4879	0.0121	0.063	0.0009	461	65	403	8	394	6
MKYT-2.11	986	104	70	0.0543	0.0014	0.4813	0.0099	0.0643	0.0009	382	58	399	7	402	6
MKYT-2.12	882	95	64	0.0555	0.0016	0.5007	0.0119	0.0655	0.001	432	64	412	8	409	6
MKYT-2.13	1004	115	74	0.0559	0.0019	0.5133	0.0099	0.0666	0.001	448	20	421	7	416	6
MKYT-2.14	910	62	66	0.056	0.0014	0.5119	0.0102	0.0663	0.001	452	56	420	7	414	6
MKYT-2.17	1588	93	112	0.0563	0.0019	0.5042	0.0097	0.065	0.001	463	20	415	7	406	6
MKYT-2.18	484	71	38	0.0554	0.0019	0.5295	0.0113	0.0693	0.001	429	24	432	8	432	6
MKYT-2.19	878	79	62	0.0548	0.0014	0.4827	0.0097	0.0639	0.0009	403	57	400	7	399	6
MKYT-2.20	786	66	58	0.0559	0.0018	0.5128	0.0096	0.0665	0.001	450	19	420	6	415	6
MKYT-2.21	734	102	58	0.056	0.0018	0.539	0.0101	0.0698	0.001	451	19	438	7	435	6
MKYT-2.23	646	137	49	0.0574	0.0019	0.5273	0.0103	0.0666	0.001	508	20	430	7	415	6
MKYT-2.25	548	72	41	0.056	0.0016	0.5066	0.0121	0.0656	0.001	451	64	416	8	410	6
MKYT-2.29	728	70	53	0.0559	0.0015	0.4973	0.0113	0.0645	0.001	449	61	410	8	403	6

4 讨论

4.1 马卡花岗岩年代学归属

滇东南老君山矿集区主要发育 2 期大规模的岩浆活动, 分别对应形成了老君山系列花岗岩和南温河系列花岗岩。

老君山花岗岩主要分布于矿集区中部, 出露面积约 150 km² (图 1)。岩性主要为中细粒-中粗粒花岗岩和花岗斑岩。对老君山成岩年龄, 刘玉平等^[10]和冯佳睿等^[9]获得的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 86~92 Ma 和 85~87 Ma, 这与近期利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年方法获得的年龄 86~90 Ma^[8]、80~118 Ma^[33]和 82~87 Ma^[11]在误差范围内一致, 表明老君山花岗岩形成于燕山期。

南温河花岗岩主要出露于矿集区的北部、东部、东南部地带, 在印支期发生过强烈的区域变质作用及混合岩化作用^[23,34-35], 致使部分南温河花岗岩已变质成片麻状花岗岩、花岗片麻岩。冯明刚等^[36]报道了南温河系列花岗岩中的团田斑状片麻状花岗岩的锆石 U-Pb 同位素年龄为 411 Ma, 这与后来研究发现该区存在 410~440 Ma 岩浆锆石的事实相符^[37-38]。Guo 等^[12]采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法获得南温河片麻状花岗岩年龄为 418~442 Ma。谭洪旗等^[39]获得的南温河花岗岩 SHRIMP 锆石年龄约为 441 Ma。以上结果与 Xu 等^[13]获得的南温河花岗岩锆石 U-Pb 年龄(427~436 Ma)和王丹丹等^[40]报道的锆石 U-Pb 年龄(402~417 Ma)高度一致, 表明南温河花岗岩是加里东期大规模岩浆活动的产物。

本研究获得的马卡花岗岩同位素年龄为 400~415 Ma, 与燕山期老君山花岗岩年龄相差甚远, 不属于老君山花岗岩的组成部分, 而与加里东期南温河花岗岩年龄一致, 因此, 马卡花岗岩应归属于南温河系列花岗岩, 研究结果与原有认识不一样。

4.2 马卡花岗岩对找矿的指示

研究表明, Th 和 Y 随岩浆结晶分异演化的趋势是区分花岗质岩浆为准铝质或过铝质的有效依据^[41]。由于 Th 和 Y 在过铝质岩浆演化早期优先进入 Th 和 Y 富集的矿物(如独居石), 分异 S 型花岗岩 ($w(\text{Rb}) > 200 \times 10^{-6}$) 的 Th 和 Y 含量低, 并与 Rb 含量呈现负相关关系; 相反, Th 和 Y 富集的矿物不在准铝质岩浆演化早期优先结晶, 所以分异 I 型花岗岩的 Th 和 Y 含量高, 并随着 Rb 含量增加而升高^[42-43]。研究表明, 马卡花岗岩 Rb 和 Th、Y 之间为此消彼长的关系, Rb 含量高的样品具有较低的 Th 和 Y, 这与 Chappell^[41]研究的澳大利亚 Lachlan 褶皱带中 S 型花岗岩演化趋势相一致(图 6)。马卡花岗岩与典型南温河系列花岗岩样品数据点均沿 S 型花岗岩趋势线展布(图 6), 表明马卡花岗岩是以 S 型花岗岩类为主。

马卡花岗岩的主量元素具有以下特征, $w(\text{SiO}_2)$ 位于 72.47%~74.63% 之间, 平均值 73.61%; $w(\text{K}_2\text{O}) > w(\text{Na}_2\text{O})$, 属于高钾岩系, 相对贫钠。 $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 比值为 1.92~5.87, 具有 S 型花岗岩特征。里特曼指数 $\sigma < 3.3$, 属于正常钙-碱性花岗岩, 铝饱和指数 $I_A/I_{\text{CNK}} > 1.11$, 为强过铝质花岗岩^[44]。马卡花岗岩为高钾的强过铝质花岗岩 S 型花岗岩。

马卡花岗岩的周围分布有不同规模的钨锡多金属矿床, 比如东北部的新寨大型锡矿床, 西部的箐脚锡矿和马卡区内的钨钼多金属矿床(图 1)。Du 等^[4]报道了新寨锡矿床的成矿年龄为 419 Ma, 表明其成矿作用可能与加里东期的南温河系列花岗岩有关。新寨锡矿床内还出露有少量的矽卡岩, 有的矽卡岩具有锡矿化, 这可能是加里东期的花岗岩与围岩(含少量碳酸盐岩类)相互作用的产物。根据目前探矿工程揭露信息, 马卡钨钼多金属矿床内也有少量的弱锡矿化, 可能也暗示该矿床的成矿作用与加里东期的马卡花岗岩关系密切。

本研究厘定了马卡花岗岩并不属于老君山花岗岩的组成部分, 而是归属加里东期的南温河系列花岗岩, 这对下一步找矿工作具有重要的指导作用, 即在马卡岩体周围要重视寻找加里东期的钨锡矿床。

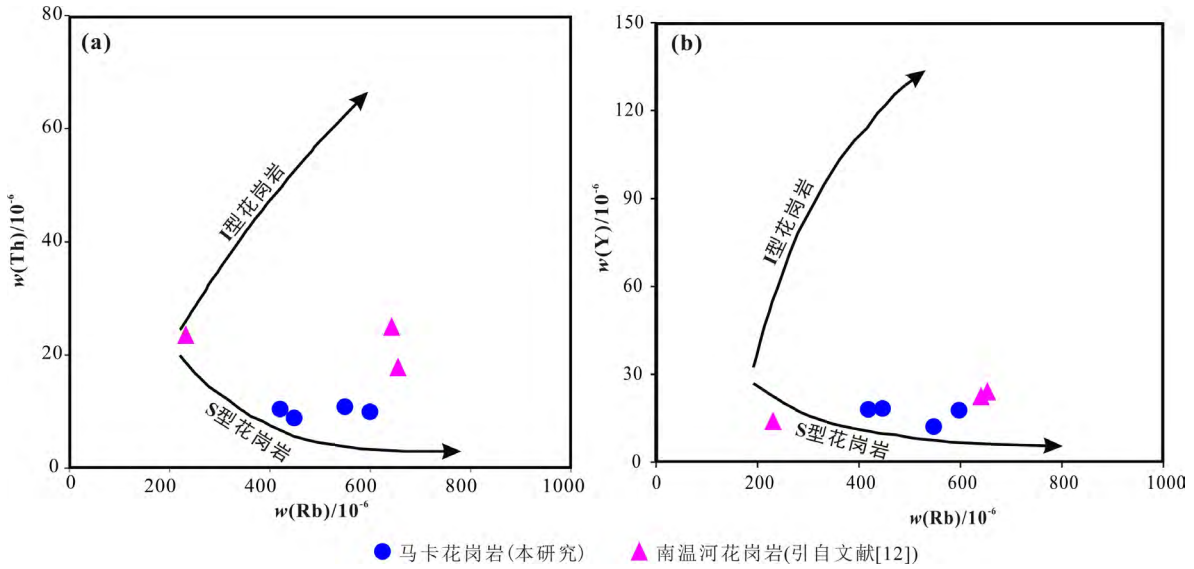
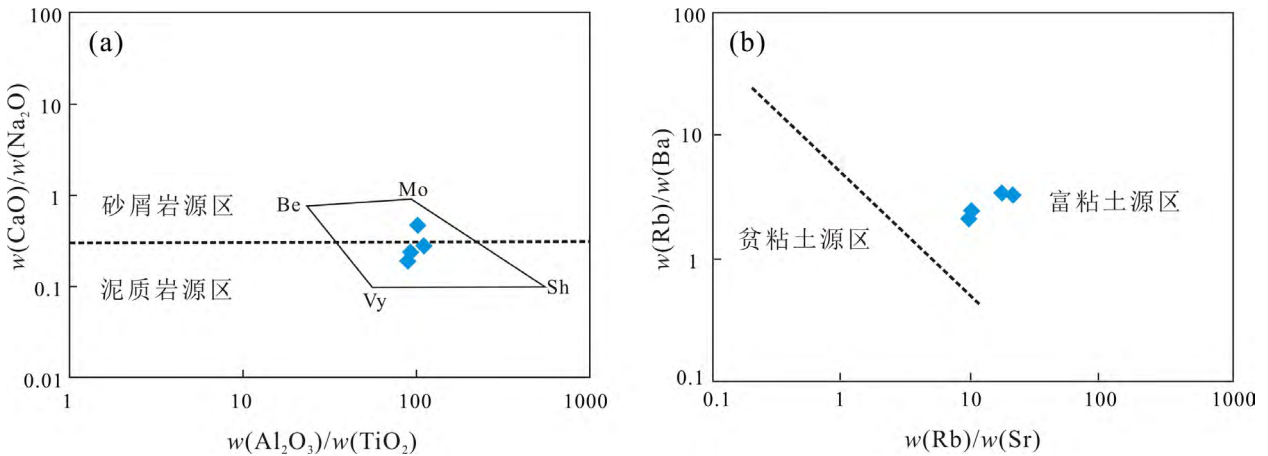


图6 马卡花岗岩 Th-Rb 和 Y-Rb 图 (I型和S型花岗岩趋势引自文献[41])

Fig. 6. Diagrams of Th-Rb and Y-Rb for samples of the Maka granite (modified from [41]).

4.3 马卡花岗岩物质来源初探

研究表明, CaO/Na_2O 比值是判别过铝质花岗岩源区成分的有效途径。如果 $w(CaO)/w(Na_2O)$ 大部分小于 0.3, 表明该过铝质花岗岩的原岩是泥质, 即富粘土、贫斜长石, 暗示它们形成于成熟的大陆地台环境^[44]。根据 Sylvester^[44]对来自阿尔卑斯山脉、喜马拉雅山脉、海西构造带、不列颠加里东构造带和澳大利亚拉克伦褶皱带的多个长英质侵入体的研究发现, 不同造山带后碰撞花岗岩的 Al_2O_3/TiO_2 常随 CaO/Na_2O 比值降低而增加。马卡花岗岩样品绝大部分落入泥质岩源区 (图 7a)。



Be-澳大利亚拉克伦褶皱带中 Bethanga 岩体; Mo-阿尔卑斯造山带中的 Moschumandl 岩体; Vy-海西造山带中的 Vysoky Kamen 岩体; Sh-喜马拉雅造山带中的 Shisha Pangma 岩体

图7 马卡花岗岩 (a) $CaO/Na_2O-A l_2O_3/TiO_2$ 和 (b) $Rb/B a -Rb/Sr$ 图解 (据文献[44])

Fig. 7. Diagrams of $CaO/Na_2O-A l_2O_3/TiO_2$ (a) and $Rb/B a -Rb/Sr$ (b) for samples of the Maka granite.

Rb/Sr 比值也能有效反映源区信息, 若 $w(Rb)/w(Sr) > 0.9$ 为 S 型花岗岩; $w(Rb)/w(Sr) < 0.9$ 为 I 型花岗岩^[45]。马卡花岗岩样品 $w(Rb)/w(Sr)$ 介于 9.39~20.30 之间, 平均 14.34, 故花岗岩属于典型的 S 型, 指示花岗岩的原岩来自成熟的上陆壳, 并经历了较高程度的结晶分异。对于原岩的成分, 过铝质花岗岩 $Rb-Sr-Ba$ 的变化与它们源区中起作用的泥质岩和砂屑岩的源区一致, 因此可以利用 $Rb-Sr-Ba$ 系

统判断源区成分^[44]，马卡花岗岩样品全部落入富粘土源区（图 7b）。此分析结果与上述的 CaO 和 Na₂O 比值判别图相一致。综上所述，马卡花岗岩的物质来源为富粘土的泥质来源，来自于成熟上地壳的泥质岩源区。

5 结 论

1) 精确厘定了马卡花岗岩形成年龄 400~415 Ma，应归属于加里东期南温河系列花岗岩，并非老君山花岗岩组成部分。

2) 马卡花岗岩为高碱、高钾、强过铝质的 S 型花岗岩，主要以富粘土质来源为主。

3) 厘清了马卡花岗岩年代学归属问题，这对探究加里东期成矿作用具有重要指示意义。

致谢：野外工作得到云南省麻栗坡天银丰矿业有限公司赵道工程师、王海蛟工程师等一线地质工作人员的大力帮助，在此一并感谢！

参 考 文 献：

- [1] 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题[J]. 中国科学基金, 2019, 33(2): 106-111.
- [2] 王大鹏, 张乾, 刘玉平, 等. 滇东南马关县南捞地区成岩、成矿时代约束[J]. 矿物学报, 2015, 35(S1): 720.
- [3] 刀学强, 李山志, 韦文彪, 等. 滇东南老君山西部钨矿类型探讨[J]. 世界有色金属, 2017(8): 296-298.
- [4] Du S J, Wen H J, Qin C J, et al. Caledonian ore-forming event in the Laojunshan mining district, SE Yunnan Province, China: In situ LA-MC-ICP-MS U-Pb dating on cassiterite[J]. *Geochemical Journal*, 2015, 49(1): 11-22.
- [5] Du S J, Wen H J, Liu S R, et al. Mineralogy and Metallogeneses of the Sanbao Mn-Ag (Zn-Pb) deposit in the Laojunshan ore district, SE Yunnan Province, China[J]. *Minerals*, 2020, 10(8): 1-20.
- [6] 杜胜江, 温汉捷, 秦朝建, 等. 滇东南老君山矿集区三保锰银矿床碳氧同位素特征及其意义[J]. 黄金科学技术, 2018, 26(3): 261-269.
- [7] 云南省地质局. 1:5 万地质矿产报告, 麻栗坡县幅, 2000.
- [8] Xu B, Jiang S Y, Wang R, et al. Late Cretaceous granites from the giant Dulong Sn-polymetallic ore district in Yunnan Province, South China: Geochronology, geochemistry, mineral chemistry and Nd-Hf isotopic compositions[J]. *Lithos*, 2015, 218: 54-72.
- [9] 冯佳睿, 毛景文, 裴荣富, 等. 滇东南老君山地区印支期成矿事件初探——以新寨锡矿床和南秧田钨矿床为例[J]. 矿床地质, 2011, 30(1): 57-73.
- [10] 刘玉平, 李正祥, 李惠民, 等. 都龙锡锌矿床锡石和锆石 U-Pb 年代学: 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩-成矿事件[J]. 岩石学报, 2007, 23(5): 967-976.
- [11] 赵震宇. 云南省马关县都龙锡多金属矿床—岩浆作用及矿床成因研究[D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2017.
- [12] Guo L G, Liu Y P, Li C Y, et al. SHRIMP zircon U-Pb geochronology and litho-geochemistry of Caledonian granites from the Laojunshan area, southeastern Yunnan province, China: Implications for the collision between the Yangtze and Cathaysia blocks[J]. *Geochemical Journal*, 2009, 43(2): 101-122.
- [13] Xu B, Jiang S Y, Hofmann A W, et al. Geochronology and geochemical constraints on petrogenesis of Early Paleozoic granites from the Laojunshan district in Yunnan Province of South China[J]. *Gondwana Research*, 2016, 29(1): 248-263.
- [14] 李东旭, 许顺山. 变质核杂岩的旋扭成因——滇东南老君山变质核杂岩的构造解析[J]. 地质论评, 2000, 46(2): 113-120.
- [15] 张世涛, 冯明刚, 吕伟. 滇东南南温河变质核杂岩解析[J]. 中国区域地质, 1998, 17(4): 390-397.
- [16] 涂光炽. 我国西南地区两个别具一格的成矿带 (域) [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2002, 21(1): 1-2.
- [17] Yang G S, Wen H J, Ren T, et al. Geochronology, geochemistry and Hf isotopic composition of Late Cretaceous Laojunshan granites in the western Cathaysia block of South China and their metallogenic and tectonic implications[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 117: 1-15.
- [18] 冯佳睿, 毛景文, 裴荣富, 等. 云南瓦渣钨矿区老君山花岗岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及成因探讨[J]. 岩石学报, 2010, 26(3): 845-857.
- [19] 李建康, 王登红, 李华芹, 等. 云南老君山矿集区的晚侏罗世-早白垩世成矿事件[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2013, 38(5): 1023-1036.
- [20] 李进文, 裴荣富, 王永磊, 等. 云南都龙锡锌矿区同位素年代学研究[J]. 矿床地质, 2013, 32(4): 768-783.
- [21] 刘玉平, 叶霖, 李朝阳, 等. 滇东南发现新元古代岩浆岩: SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学证据[J]. 岩石学报, 2006, 22(4): 916-926.
- [22] 王小娟, 刘玉平, 缪应理, 等. 都龙锡锌多金属矿床 LA-MC-ICPMS 锡石 U-Pb 测年及其意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(3): 867-876.
- [23] 王学焜. 麻栗坡新寨锡矿床地质地球化学特征[J]. 云南地质, 1994, 13(1): 1-16.
- [24] 杨光树, 王凯, 燕永锋, 等. 滇东南老君山锡-钨-铋-钼多金属矿集区含矽卡岩成因研究[J]. 岩石学报, 2019, 35(11): 3333-3354.

- [25] 张斌辉, 丁俊, 任光明, 等. 云南马关老君山花岗岩的年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 地质学报, 2012, 86(4): 587-601.
- [26] Du S J, Wen H J. A New Type of Beryllium Resource from the Maka Tungsten Polymetallic Deposit, Laojunshan Ore Cluster, SE Yunnan Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 2014, 88(S2): 1447-1448.
- [27] 杜胜江, 温汉捷, 秦朝建, 等. 云南麻栗坡县马卡钨多金属矿床中铍赋存状态研究及意义[J]. 矿物学报, 2014, 34(4): 446-450.
- [28] 李怀坤, 陆松年, 李惠民, 等. 侵入下马岭组的基性岩床的锆石和斜锆石 U-Pb 精确定年—对华北中元古界地层划分方案的制约[J]. 地质通报, 2009, 28(10): 1396-1404.
- [29] Andersen, T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical geology*, 2002, 192(1): 59-79.
- [30] Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, et al. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 2004, 211(1): 47-69.
- [31] Liu Y P, Gao S, Hu Z, 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.
- [32] Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel, Spec[Z]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003 (4): 25-32.
- [33] 蓝江波, 刘玉平, 叶霖, 等. 滇东南燕山晚期老君山花岗岩的地球化学特征与年龄谱系[J]. 矿物学报, 2016, 36(4): 441-454.
- [34] Maluski H, Lepvrier C, Jolivet L, et al. Ar-Ar and fission-track ages in the Song Chay Massif: Early Triassic and Cenozoic tectonics in northern Vietnam[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2001, 19(1): 233-48.
- [35] Roger F, Leloup P H, Jolivet M, et al. Long and complex thermal history of the Song Chay metamorphic dome (northern Vietnam) by multi-system geochronology[J]. *Tectonophysics*, 2000, 321(4): 449-66.
- [36] 冯明刚, 张世涛, 吕伟. 中国祖母绿矿床地质特征及其找矿方向[J]. 云南地质, 2000, 19(1): 37-42.
- [37] Lan C Y, Chung S L, Lo C H, et al. First evidence for Archean continental crust in northern Vietnam and its implications for crustal and tectonic evolution in Southeast Asia[J]. *Geology*, 2001, 29(3): 219-222.
- [38] 刘玉平, 李朝阳, 谷团, 等. 滇东南老君山中—深变质岩系铅同位素特征及时代归属[J]. 矿物学报, 2000, 3: 228-232.
- [39] 谭洪旗, 刘玉平, 徐伟, 等. 中-浅正变质岩锆石 SHRIMP 法与 TIMS 法测年结果不一致处理—以滇东南南温河花岗岩为例[J]. 矿物学报, 2011, 31(1): 62-69.
- [40] 王丹丹, 李宝龙, 朱德全, 等. 滇东南老君山地区变质岩锆石 U-Pb 年代学及其构造意义[J]. 地质学报, 2015, 89(10): 1718-1734.
- [41] Chappell, B. Aluminium saturation in I-and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 1999, 46(3): 535-551.
- [42] 李献华. 华南白垩纪岩浆活动与岩石圈伸展--地质年代学和地球化学制约. 环境资源与可持续发展[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 264-278.
- [43] 刘馨, 毛景文, 叶会寿, 等. 江西省武功山地区浒坑花岗岩的锆石 U-Pb 定年及元素地球化学特征[J]. 岩石学报, 2008, 24(8): 1813-1822.
- [44] Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 1998, 45(1): 29-44.
- [45] 王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 等. 桐庐 I 型和相山 S 型两类碎斑熔岩对比[J]. 岩石学报, 1993, 9(1): 44-54.