

中甸岛弧红山地区两期中酸性侵入岩的年代学、地球化学特征及其成因*

黄肖潇^{1,2} 许继峰^{1**} 陈建林¹ 任江波³

HUANG XiaoXiao^{1,2}, XU JiFeng^{1**}, CHEN JianLin¹ and REN JiangBo³

1. 同位素地球化学国家重点实验室,中国科学院广州地球化学研究所,广州 510640

2. 中国科学院研究生院,北京 100039

3. 广州海洋地质调查局,广州 510075

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China

2012-01-03 收稿, 2012-04-10 改回.

Huang XX, Xu JF, Chen JL and Ren JB. 2012. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of two periods of intermediate-acid intrusive rocks from Hongshan area in Zhongdian arc. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5):1493–1506

Abstract Two periods of intermediate-acid magmatic activities occur in Hongshan area, Zhongdian arc, which were mainly emplaced at ~216Ma and ~76Ma, respectively. The 216Ma magmatism, which is associated with the porphyric Cu-Mo mineralization, was produced during the westward subduction of Ganzi-Litang ocean plate in Late Triassic. It is composed of quartz dioritic porphyrites, and shows some geochemical characteristics of an adakite, such as high Sr (938×10^{-6} in average), but low Y (18.6×10^{-6} in average), Yb (1.7×10^{-6} in average) contents, and strongly fractionation between LREE and HREE ($(La/Yb)_N = 20.1$ in average). Meanwhile, it has relatively high Mg[#] (51 in average), Cr (103×10^{-6} in average) and Ni (22×10^{-6} in average) concentrations. These quartz dioritic porphyrites show geochemical characteristics same as or similar to those of the ore-bearing rocks in Pulang-Xuejiping, hinting that the both had a similar composition in source and/or were formed by a tectonic event. On the other hand, 76Ma granitic porphyries in Hongshan area have low Sr (149×10^{-6} in average), Y (10.8×10^{-6} in average) and Yb (0.9×10^{-6} in average) concentrations, and strongly fractionation between LREE and HREE ($(La/Yb)_N = 56.0$ in average), which is obviously different from the A-type granite of Gaogong-Cuomolong in Yidun island arc. It is likely the result of partial melting of the middle-lower crust of Hongshan area. Combined with other porphyric rocks and deposits in Zhongdian arc, the 76Ma intermediate-acid magmatism in Hongshan area, which is associated with porphyric mineralization, were generated in a post-orogenic extensional setting in Late Cretaceous.

Key words Porphyric deposit; Geochemistry; Intermediate-acid rock; Hongshan; Zhongdian arc

摘要 青藏高原东部中甸岛弧红山地区发育有印支期和燕山晚期两期中酸性岩浆侵入活动,主要集中在~216Ma和~76Ma两个时期。印支期中酸性岩浆的侵入活动形成于甘孜-理塘洋西向俯冲背景下,与矽卡岩型铜多金属成矿作用密切相关。形成于印支期的红山石英闪长玢岩具有埃达克质岩的部分地球化学特征,如高Sr(平均为 938×10^{-6})、低Y(平均为 18.6×10^{-6})、Yb(平均为 1.7×10^{-6})含量,轻重稀土分异明显($(La/Yb)_N$ 平均为20.1),同时也有着较高的Mg[#](平均为51)、Cr(平均为 103×10^{-6})、Ni(平均为 22×10^{-6})含量,指示印支期红山中酸性岩与普通-雪鸡坪成矿岩体有着相似的地球化学特征,二者可能有着相似的物质源区和成岩模式。而形成于燕山晚期的红山花岗岩斑岩具有低Sr含量(平均为 149×10^{-6})和更低的Y(平均为 10.8×10^{-6})、Yb(平均为 0.9×10^{-6})含量,轻重稀土强烈分异($(La/Yb)_N$ 平均为56.0),明显区别于义敦岛弧弧后区的高贡-措莫隆A型花岗岩,前者很可能是红山中下地壳部分熔融的产物。结合中甸岛弧发育于燕山晚期的斑岩型矿床,我们认为该地区发育于燕山晚期的中酸性岩浆作用以及与之相联系的斑岩型矿床形成于造山后伸展环境下。

关键词 斑岩矿床;地球化学;中酸性岩浆活动;红山;中甸岛弧

中图法分类号 P588.121; P588.122; P597.3

* 本文受国家973项目(2009CB421004)、中科院知识创新项目(KZCX2-YW-Q04)、国家自然科学基金项目(40872055、40930316、41073033)和中国地质调查局项目(1212010818098)联合资助。

第一作者简介:黄肖潇,女,1989年生,硕士生,地球化学专业,E-mail: huangxx@gig.ac.cn

** 通讯作者:许继峰,男,研究员,主要从事特提斯地质和成矿、青藏高原中-新生代火山岩等研究,E-mail: jifengxu@gig.ac.cn

1 引言

中甸岛弧位于“三江”义敦岛弧南部,包括甘孜-理塘洋以西,格咱断裂以东的岛弧区(图1),是三江构造-岩浆-成矿

带的重要组成部分(杨岳清等,2002;侯增谦等,2004),通常被认为是甘孜-理塘洋壳向西俯冲形成的。作为我国重要的铜、铅、锌、钼多金属成矿带,该构造单元不仅产出了如普朗斑岩铜矿、雪鸡坪斑岩铜矿、红山砂卡岩型铜矿等印支期矿床,还发育了与燕山晚期岩浆活动相关的一系列成矿作用。

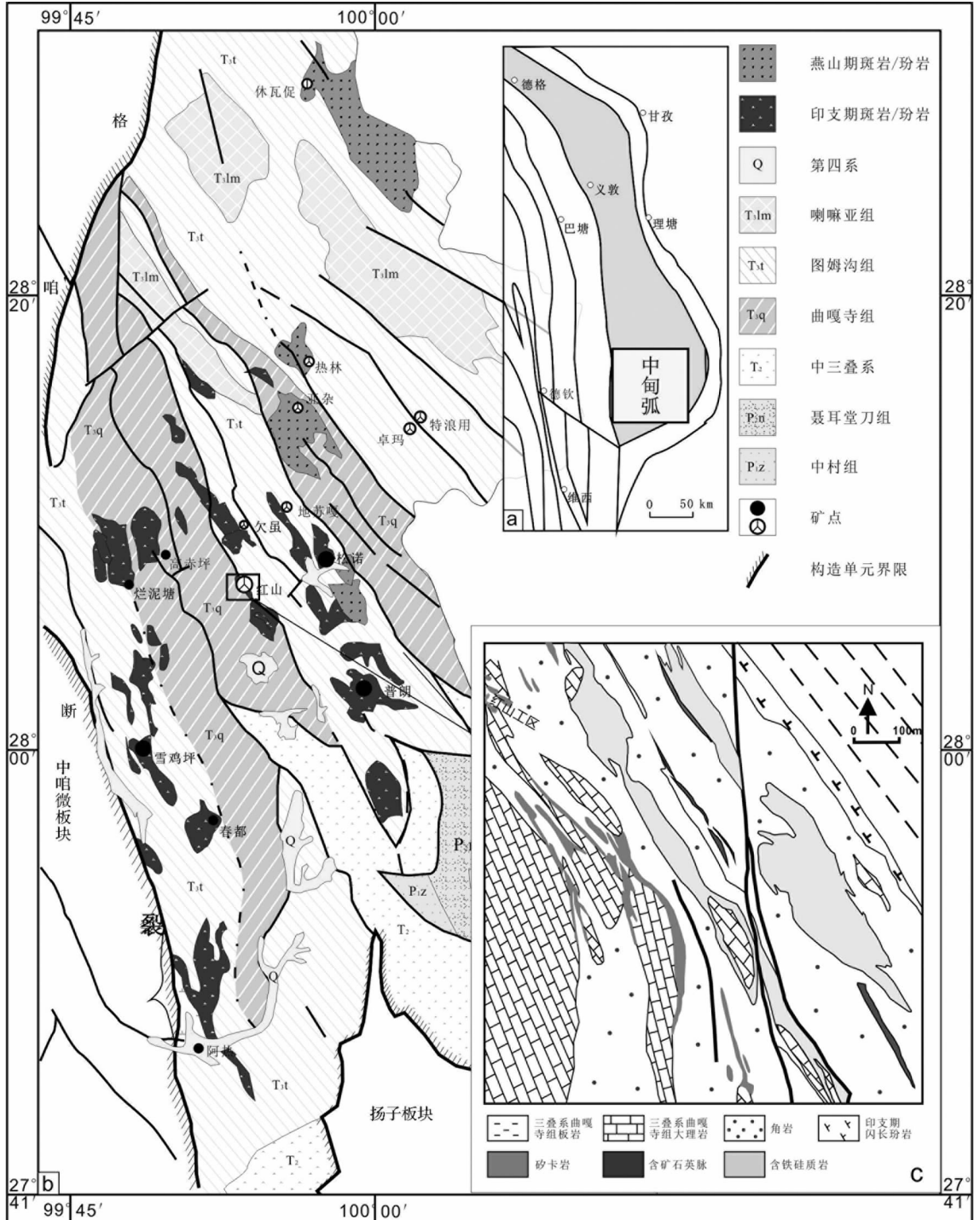


图1 中甸岛弧大地构造位置(a)和地质简图(b)(据任江波等,2011a)及研究区地质简图(c,据徐兴旺等,2006修改)

Fig.1 Simplified geological map of Zhongdian island arc (a, b, after Ren *et al.*, 2011a) and geological map of the studied area (c, after Xu *et al.*, 2006)

近年来已有很多对印支期成矿斑岩以及其代表性斑岩型矿床的岩石学、年代学、矿床学的研究(曾普胜等, 2003, 2006; 林清茶等, 2006; 李文昌, 2007; 李文昌等, 2009; 李青, 2009; 庞振山等, 2009; 王守旭等, 2007; 任江波等, 2011a; 陈建林等, 2011), 但是对于印支期矽卡岩型矿床以及燕山期岩浆活动与成矿的研究却相对薄弱。

红山 Cu 多金属矿床位于中甸构造-岩浆岩区中部, 因发育石榴子石矽卡岩, 并且处于矽卡岩型 Cu 多金属矿发育的高赤坪-红山-洛吉侵入岩带中而被归为矽卡岩型矿床(周维全等, 1976; 谭雪春等, 1985^①)。前人研究认为, 与红山矽卡岩型铜多金属成矿系统紧密相关的石英闪长玢岩和石英二长斑岩岩枝、岩脉, 为中甸岛弧印支期中-酸性岩浆侵入的产物, 其中石英二长斑岩的 Rb-Sr 等时线年龄为 214Ma(云南省地质矿产局, 1990; 杨岳清等, 2002)。虽然早期印支期中酸性岩石年代学研究结果显示成矿斑岩具有不同的形成时间(曾普胜等, 2003, 2004; 李文昌, 2007), 然而最近几年高精度的锆石年代学揭示该地区的岛弧构造-岩浆活动可能是同一构造作用的结果(林清茶等, 2006; 任江波等, 2011b)。因此, 对红山印支期中酸性岩石高精度的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年代学研究将有助于建立中甸岛弧印支期中酸性岩石系统的时空坐标, 为研究岛弧带岩浆与构造演化过程提供精确的年龄数据限制。

同时, 近年研究发现, 在红山矿区深部、矽卡岩角岩带下部, 有隐伏的花岗斑岩体, 发育有花岗斑岩 Cu-Mo 矿化与含矿石英脉(李文昌, 2007), 花岗斑岩的锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄为 81.1 ± 0.5 Ma(王新松等, 2011), 含矿石英脉中辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄为 77 ± 2 Ma(徐兴旺等, 2006)。那么, 红山地区是否还存在燕山晚期岩浆活动, 并且由此发育了斑岩型 Cu-Mo 成矿系统? 与同样形成于造山后伸展背景下的高贡-措莫隆 A 型花岗岩在地球化学特征、岩石成因上又有何差异?

基于以上问题, 本文试图通过对红山地区中酸性岩石的年代学和地球化学的研究, 探讨其岩石成因以及构造背景, 同时与前人对中甸成矿岩体的研究成果作对比, 从而对中甸岛弧的构造演化加以约束。

2 区域地质概况

中甸岛弧是义敦岛弧南段的一部分, 该地区经历了印支期俯冲造山作用、燕山期碰撞造山作用和喜山期陆内汇聚作用三大阶段(杨岳清等, 2002; 侯增谦等, 2004), 与之相对应发育三期岩浆侵入活动(侯增谦等, 2001, 2004), 即印支期的岛弧型中-酸性岩浆侵入活动(237 ~ 206Ma)、燕山晚期的花岗岩浆侵入活动(135 ~ 73Ma)及喜马拉雅期的正长(斑)岩-二长(斑)岩浆侵入活动(65 ~ 15Ma)。与三期岩浆作用相对应, 在中甸-岛弧区也发育有三期成矿作用: 如印支期以雪鸡坪、普朗等斑岩型矿床和红山、浪都等矽卡岩型矿

床为主的铜金多金属矿化, 燕山晚期以休瓦促、热林等蚀变花岗岩-热液石英脉型矿床(点)为主的钨-钼矿化; 喜马拉雅期的以诺东、东炉房等斑岩型矿床(点)为主的金铜矿化(李建康等, 2007)。

红山 Cu 多金属矿床位于中甸岛弧中部, 中甸县城东北 45km 处。矿区主要出露图姆沟组砂板岩夹结晶灰岩、中酸性火山岩, 地表仅有零散的印支期石英闪长玢岩岩墙和石英二长斑岩岩枝出露。红山矿床主要存在两种成因类型的矿体, 矽卡岩型矿体和热液石英脉型矿体。本文研究样品采自红山矿区的 0901 号钻孔岩芯, 该钻孔由上至下在岩性上可划分为以下 3 段: 顶部深 643 ~ 668m 处为深灰色角岩; 中段深 674 ~ 807m 处为深灰色石英闪长玢岩, 并在 790 ~ 800m 处夹有灰白色花岗斑岩; 下段 817 ~ 899m 岩芯为浅灰白色花岗斑岩。部分石英闪长玢岩与花岗斑岩中有石英细脉, 石英脉中含黄铁矿与辉钼矿。本文取其中 4 件石英闪长玢岩岩芯(对应深度分别为 702m, 763m, 773m, 807m)与 4 件花岗斑岩岩芯(对应深度分别为 800m, 841m, 887m, 890m)作为主要研究对象。石英闪长玢岩为深灰色, 呈斑状结构; 斑晶含量约 10%, 主要有斜长石、角闪石、黑云母、石英, 副矿物有黄铁矿、磷灰石、锆石等, 基质为隐晶质。斑晶大小约 1 ~ 5mm, 斜长石呈板条状, 晶面浑浊, 呈绢云母化(图 2a, b)。花岗斑岩主要为浅灰白色, 呈斑状结构; 斑晶含量约 20%, 主要有石英、钾长石、黑云母, 副矿物为磁铁矿、磷灰石、锆石等, 基质为隐晶质。斑晶大小约 2 ~ 3mm, 石英斑晶(10%)为无色, 他形粒状; 钾长石、斜长石, 板条状, 晶面浑浊, 呈绢云母化(图 2c, d)。

3 样品处理及分析方法

本次研究对采自红山矿区的钻孔岩芯样品作了年代学研究, 其中样品 HS-763 为石英闪长玢岩、HS-800 为花岗斑岩。

选取的锆石利用中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室的激光剥蚀等离子质谱(LA-ICPMS)进行 U-Pb 测年。测试所用激光剥蚀系统为 193nm ArF-excimer 激光器的 GeoLas 2005, 激光束直径为 30um, 以 He 作为剥蚀物质载气。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2008, 2010)完成。加权平均年龄和谐图的绘制采用 Ludwig 的 Isoplot 3.0(Ludwig *et al.*, 2003)完成。

样品的主量元素和微量元素分析在中国科学院广州地球化学研究所完成, 在处理前选取新鲜至弱蚀变的样品, 去

① 谭雪春, 曾群望, 苏宁宁. 1985. 滇西东部斑岩与斑岩铜矿. 云南省地质科学研究所科研报告, 1-106

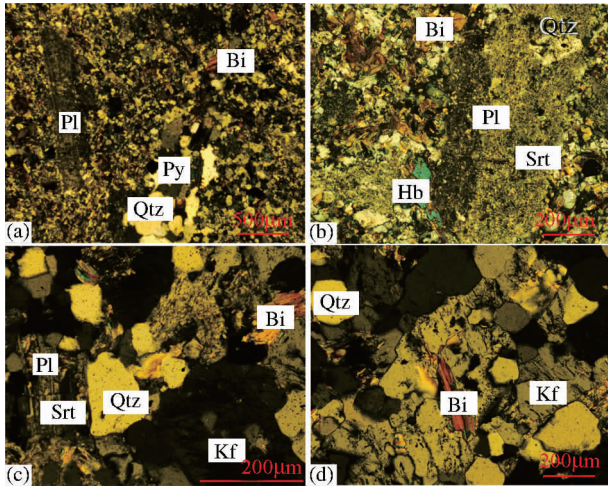


图2 红山石英闪长玢岩(a,b)和红山花岗斑岩(c,d)镜下特征

正交偏光. Qtz-石英; Pl-斜长石; Kf-钾长石; Bi-黑云母; Hb-角闪石; Py-黄铁矿; Srt-绢云母化

Fig. 2 Microphoto of quartz diorite porphyrite (a, b) and granite porphyry (c, d) in Hongshan

除风化面,手工碎至1mm,依次用3%的HCl和去离子水超声浸泡和清洗,烘干后用不锈钢钵粉碎至200目用于化学分

析。主量元素采用碱熔玻璃片XRF法分析,微量元素采用高温高压消解,利用PE Elan 6000型ICP-MS分析。主量元素的分析精度好于5%,微量元素的分析精度优于10%。相关分析方法和程序参见Chen *et al.* (2010)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

两件样品的锆石阴极发光图像显示(图3a, b),大部分晶形呈长柱状,长宽比为1:2~1:3,长50~150 μm ,具有明显的振荡环带结构。锆石分析测试的结果显示REE呈强烈的左倾式,Th/U均很高(0.31~3.03),这些比值远大于变质锆石的Th/U比值(< 0.1),而属典型的岩浆成因锆石(Williams *et al.*, 1996)。两件样品锆石U-Pb定年分析数据详见表1,谐和图及加权平均年龄见图3(c, d),定年结果分述如下:

HS-763 采自红山0901号钻孔岩芯763m处,样品的11个分析点(表1),Th含量为 $124 \times 10^{-6} \sim 2661 \times 10^{-6}$,U含量为 $115 \times 10^{-6} \sim 878 \times 10^{-6}$,Th/U为0.90~3.03,它们均落在谐和线上或其附近。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 年龄加权平均值为 $216.1 \pm 3.2\text{Ma}$ (MSWD=1.2)(图3c),代表红山石英闪长玢岩的结晶年龄。

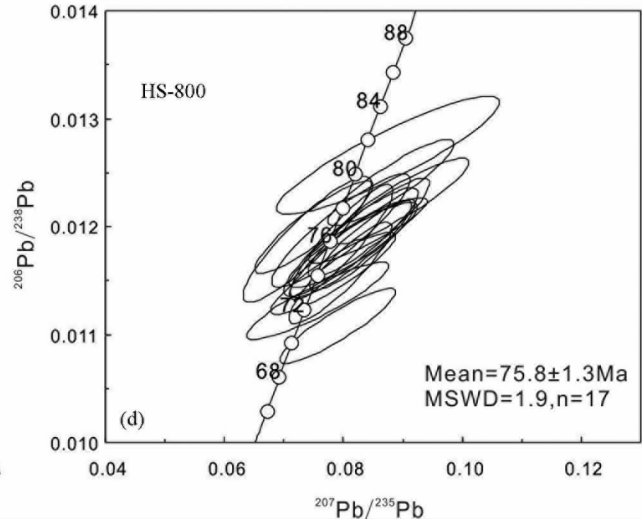
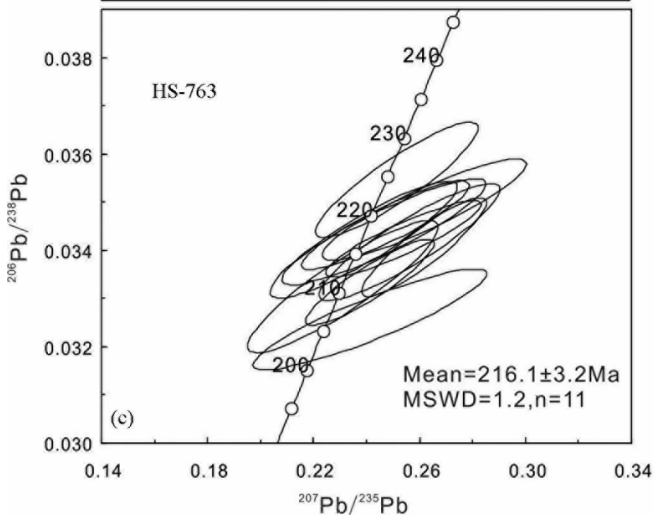
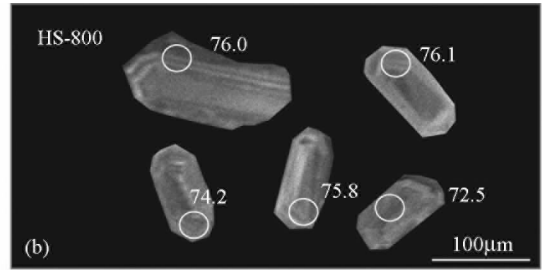
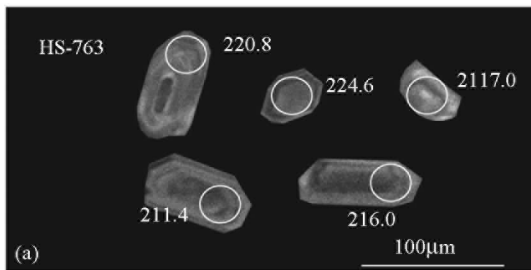


图3 红山石英闪长玢岩(HS-763)和花岗斑岩(HS-800)的锆石阴极发光图片(a, b)和U-Pb年龄谐和图(c, d)

Fig. 3 The CL images of zircon (a, b) and LA-ICPMS U-Pb concordant curves (c, d) of quartz diorite porphyrite (HS-763) and granitic porphyry (HS-800) in Hongshan

表1 中甸岛弧红山地区石英闪长玢岩(HS-763)和花岗斑岩(HS-800)锆石U-Pb定年分析结果表

Table 1 U-Pb zircon dating results of quartz dioritic porphyrite (HS-763) and granitic porphyry (HS-800) from Hongshan area in Zhongdian arc

测点号	Th U		Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
	(×10 ⁻⁶)			比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	Age (Ma)	1σ	Age (Ma)	1σ	Age (Ma)	1σ
HS-763-01	808	351	2.30	0.05055	0.00495	0.23112	0.02375	0.03325	0.00090	220.4	211.1	211.1	19.6	210.8	5.6
HS-763-02	662	418	1.58	0.05557	0.00358	0.26166	0.01552	0.03407	0.00068	435.2	144.4	236.0	12.5	216.0	4.2
HS-763-03	238	264	0.90	0.05201	0.00457	0.25133	0.02022	0.03545	0.00079	287.1	199.1	227.7	16.4	224.6	4.9
HS-763-04	124	115	1.08	0.04968	0.00476	0.23885	0.02322	0.03423	0.00080	189.0	201.8	217.5	19.0	216.9	5.0
HS-763-05	195	150	1.30	0.05192	0.00568	0.24653	0.02543	0.03439	0.00072	283.4	256.5	223.8	20.7	217.9	4.5
HS-763-06	172	160	1.08	0.05389	0.00488	0.25616	0.02252	0.03417	0.00080	364.9	208.3	231.6	18.2	216.6	5.0
HS-763-07	175	164	1.07	0.05360	0.00650	0.24122	0.02910	0.03257	0.00069	353.8	275.9	219.4	23.8	206.6	4.3
HS-763-08	541	322	1.68	0.05360	0.00391	0.25396	0.01942	0.03424	0.00052	353.8	166.6	229.8	15.7	217.0	3.3
HS-763-09	314	242	1.30	0.05157	0.00449	0.24718	0.02092	0.03452	0.00061	264.9	200.0	224.3	17.0	218.8	3.8
HS-763-10	416	291	1.43	0.05466	0.00551	0.26178	0.02544	0.03484	0.00069	398.2	227.7	236.1	20.5	220.8	4.3
HS-763-11	2661	878	3.03	0.05158	0.00342	0.24131	0.01593	0.03333	0.00059	333.4	153.7	219.5	13.0	211.4	3.7
HS-800-01	858	1385	0.62	0.04977	0.00362	0.07951	0.00570	0.01157	0.00031	183.4	170.3	77.7	5.4	74.2	2.0
HS-800-02	399	911	0.44	0.04851	0.00412	0.07828	0.00687	0.01157	0.00025	124.2	198.1	76.5	6.5	74.1	1.6
HS-800-03	152	492	0.31	0.05149	0.00756	0.08753	0.01236	0.01266	0.00036	261.2	307.4	85.2	11.5	81.1	2.3
HS-800-04	639	830	0.77	0.05006	0.00432	0.08125	0.00675	0.01179	0.00030	198.2	188.9	79.3	6.3	75.6	1.9
HS-800-05	696	2172	0.32	0.04873	0.00350	0.07964	0.00575	0.01185	0.00035	200.1	94.4	77.8	5.4	76.0	2.2
HS-800-06	402	989	0.41	0.04520	0.00388	0.07500	0.00652	0.01199	0.00028			73.4	6.2	76.9	1.8
HS-800-07	412	1188	0.35	0.05116	0.00424	0.08803	0.00698	0.01241	0.00026	255.6	186.1	85.7	6.5	79.5	1.7
HS-800-08	351	1052	0.33	0.05423	0.00493	0.08963	0.00753	0.01224	0.00026	388.9	205.5	87.2	7.0	78.4	1.7
HS-800-09	567	1210	0.47	0.04484	0.00441	0.07395	0.00713	0.01188	0.00038			72.4	6.7	76.1	2.5
HS-800-10	554	1276	0.43	0.04786	0.00472	0.07961	0.00771	0.01196	0.00035	100.1	209.2	77.8	7.3	76.6	2.2
HS-800-11	689	1286	0.54	0.04911	0.00449	0.08168	0.00712	0.01183	0.00026	153.8	200.0	79.7	6.7	75.8	1.7
HS-800-12	841	1334	0.63	0.05132	0.00421	0.07903	0.00637	0.01108	0.00023	253.8	190.7	77.2	6.0	71.0	1.5
HS-800-13	983	1761	0.56	0.05102	0.00403	0.08411	0.00660	0.01196	0.00020	242.7	178.7	82.0	6.2	76.7	1.3
HS-800-14	600	1346	0.45	0.05074	0.00370	0.08325	0.00584	0.01183	0.00028	227.8	170.3	81.2	5.5	75.8	1.8
HS-800-15	504	996	0.51	0.04833	0.00515	0.07570	0.00787	0.01131	0.00023	122.3	227.7	74.1	7.4	72.5	1.5
HS-800-16	629	1413	0.45	0.04972	0.00382	0.08428	0.00673	0.01199	0.00030	189.0	161.1	82.2	6.3	76.8	1.9
HS-800-17	480	1407	0.34	0.04857	0.00449	0.08127	0.00743	0.01186	0.00033	127.9	203.7	79.3	7.0	76.0	2.1

HS-800 采自红山 0901 号钻孔岩芯 800m 处,样品的 17 个分析点(表 1), Th 含量为 $152 \times 10^{-6} \sim 983 \times 10^{-6}$, U 含量为 $492 \times 10^{-6} \sim 2172 \times 10^{-6}$, Th/U 为 0.31 ~ 0.77, 它们均落在谐和线上或其附近。²⁰⁶Pb/²³⁸Pb 年龄加权平均值为 75.8 ± 1.3 Ma (MSWD = 1.9) (图 3d), 代表红山花岗斑岩的结晶年龄。

4.2 蚀变影响

样品的主量和微量分析测试结果列在表 2 中。手标本及镜下观察显示,样品有较明显的绢云母-绿泥石化蚀变。一般情况下,高场强元素、稀土元素及过渡元素在强烈的热液蚀变过程中是稳定的,中酸性岩浆岩由于缺乏橄榄石和辉石,其中的 Mg 也是稳定的。Ti、P、Al、Fe、Mn 等主量元素不易受热液活动的影响,而 Ca、Na、K 以及一些小离子亲石元

素(如 Sr、Ba、Rb 等)却很不稳定。样品具有较低的烧失量(1.07% ~ 1.84%),且 MgO、TiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃^T、CaO、Na₂O 的含量与烧失量(LOI)之间没有明显的线性关系(图略),说明蚀变作用可能对这些元素并没有造成影响(Wang *et al.*, 2006)。而 K₂O 的含量与 SiO₂ 的含量并不相关,却随着烧失量(LOI)的增加而降低(图 4),表明其在热液蚀变过程中很不稳定。本文主要针对热液蚀变过程中的稳定元素,如高场强元素、稀土元素、MgO、Al₂O₃、Fe₂O₃^T 等展开讨论。

4.3 主量元素

在 SiO₂-(K₂O + Na₂O) 图(TAS 分类图,图 5)中,石英闪长玢岩相对花岗斑岩贫硅(前者大于 70%,后者小于 61%),石英闪长玢岩落入二长岩区域,花岗斑岩落入花岗岩区域。两类岩石 A/CNK > 1, 属于过铝质岩石;石英闪长玢

表2 中甸岛弧红山地区石英闪长玢岩和花岗斑岩主量 (wt%)、微量 ($\times 10^{-6}$) 元素分析数据表

Table 2 Major (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) analyzing results for quartz dioritic porphyrites and granitic porphyries from Hongshan area in Zhongdian arc

样品号	HS-702	HS-763	HS-773	HS-807	HS-800	HS-841	HS-887	HS-890
SiO ₂	59.59	60.02	58.89	60.94	72.65	73.15	71.10	72.70
TiO ₂	1.06	1.04	1.02	1.01	0.44	0.36	0.42	0.38
Al ₂ O ₃	16.05	15.38	15.08	15.41	13.94	13.51	14.68	14.48
Fe ₂ O ₃	5.92	6.10	7.12	5.42	1.97	1.73	1.70	1.22
MnO	0.09	0.09	0.11	0.10	0.01	0.005	0.003	0.004
MgO	3.01	3.42	3.26	3.02	0.47	0.26	0.31	0.34
CaO	4.46	3.23	3.68	3.31	0.35	0.16	0.26	0.22
Na ₂ O	3.73	3.32	4.56	3.95	2.55	1.08	3.03	1.92
K ₂ O	3.52	5.55	4.16	4.66	5.29	7.87	6.58	6.62
P ₂ O ₅	0.30	0.29	0.29	0.29	0.21	0.10	0.15	0.13
LOI	1.84	1.07	1.33	1.45	1.66	1.30	1.33	1.53
Total	99.58	99.51	99.51	99.56	99.54	99.55	99.56	99.54
Mg [#]	50.2	52.7	47.6	52.5	32.2	23.2	26.7	35.7
Sc	19.9	18.7	19.1	16.5	7.76	6.27	6.82	7.23
V	163	158	166	158	51.4	27.9	30.9	31.1
Cr	98.2	140	85.5	87.9	175	133	100	99.2
Co	18.2	14.5	16.4	12.9	5.81	6.01	6.99	4.85
Ni	26.3	22.0	20.4	18.0	11.8	7.10	6.37	5.71
Cu	669	70.2	269	67	167	217	244	194
Zn	71.5	70.5	82.3	47.9	25.5	24.9	26.0	38.5
Rb	177	294	182	230	345	399	342	372
Sr	997	801	1003	950	126	129	185	158
Y	20.5	16.1	18.6	19.1	10.9	8.33	13.3	10.8
Zr	209	201	202	200	227	265	304	253
Nb	19.2	18.05	17.09	19.89	27.94	32.78	33.12	28.48
Ba	1953	2916	2989	2157	540	824	1140	1127
La	48.4	45.6	46.0	51.1	54.0	58.4	85.0	79.1
Ce	91.8	83.4	84.7	95.3	90.6	110	149	138
Pr	10.3	9.46	9.66	10.36	9.20	11.43	14.97	13.85
Nd	36.6	33.4	34.4	36.0	29.0	35.9	46.3	42.5
Sm	6.50	5.78	6.08	6.37	4.27	5.02	6.68	5.93
Eu	1.86	1.65	1.80	1.37	0.80	0.96	1.12	0.99
Gd	6.02	5.1	5.55	5.32	3.75	4.02	5.54	4.77
Tb	0.76	0.63	0.71	0.71	0.44	0.43	0.63	0.54
Dy	3.88	3.25	3.60	3.74	1.96	1.71	2.68	2.15
Ho	0.73	0.62	0.67	0.73	0.35	0.27	0.44	0.34
Er	1.98	1.66	1.80	1.93	0.97	0.75	1.18	0.96
Tm	0.29	0.24	0.26	0.26	0.14	0.10	0.17	0.13
Yb	1.85	1.53	1.71	1.73	0.92	0.70	1.09	0.86
Lu	0.28	0.24	0.26	0.24	0.15	0.11	0.16	0.14
Hf	5.30	5.23	5.17	5.26	6.11	6.97	7.63	6.31
Ta	1.68	1.26	1.29	1.20	2.29	2.41	2.37	2.01
Pb	16.1	13.1	14.9	12.4	16.0	18.4	14.7	22.8
Th	14.3	14.3	13.7	15.0	31.8	33.5	37.2	33.3
U	3.60	3.53	2.91	3.73	10.18	6.41	7.90	6.45

岩的里特曼指数 δ 为 3.2 ~ 4.8, 属于钙碱性-碱性岩类, 而花岗斑岩的里特曼指数 $\delta < 3.3$, 为钙碱性岩; 石英闪长玢岩具

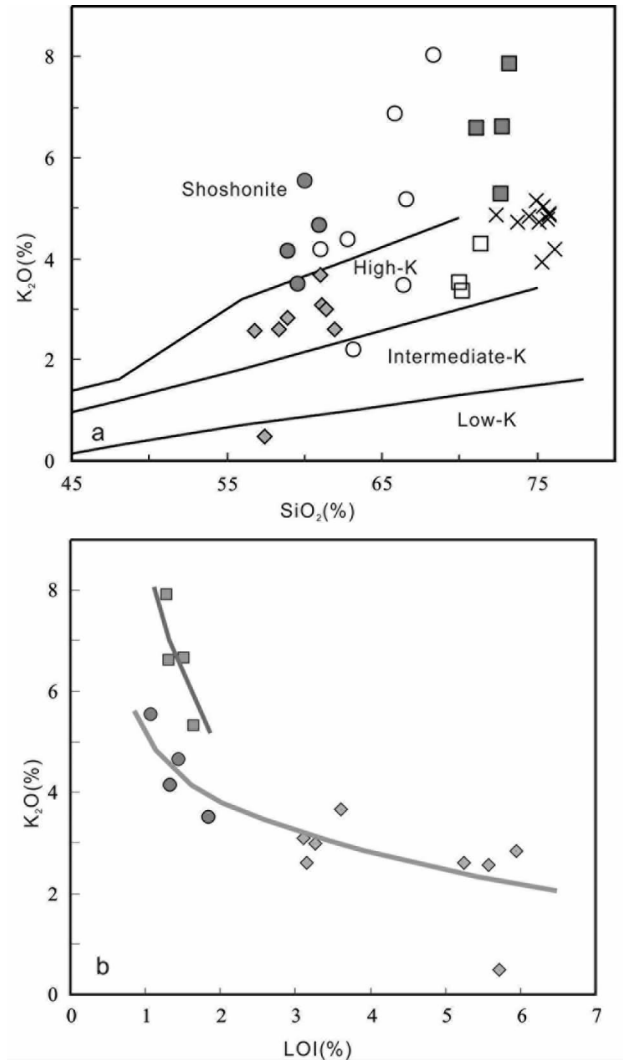


图4 中甸岛弧红山印支期与燕山晚期岩浆岩 SiO₂-K₂O 图(a, 据 Peccerillo and Taylor, 1976) 和 LOI- K₂O 图(b)

数据来源和图例同图5

Fig. 4 SiO₂ vs. K₂O diagram (a, after Peccerillo and Taylor, 1976) and LOI vs. K₂O diagram (b) for Indosinian and Late Yanshanian lavas in Zhongdian arc

有相对较高的 MgO (3.01% ~ 3.42%) 和 Mg[#] 值 (47.6 ~ 52.6), 而花岗斑岩的 MgO 含量为 0.26% ~ 0.47%, Mg[#] 值为 23.2 ~ 35.7。在 SiO₂-K₂O 图(图 4a) 中, 两类岩石均落在钾玄岩区域中。石英闪长玢岩的钾钠含量相当 (K₂O 为 3.32% ~ 5.55%; Na₂O 为 3.32% ~ 4.56%; K₂O/Na₂O 为 0.91 ~ 1.67), 石英花岗斑岩以相对富钾为特点 (K₂O 为 5.29% ~ 7.87%; Na₂O 为 1.08% ~ 3.03%; K₂O/Na₂O 为 2.08 ~ 7.27), 这与其高的钾长石与黑云母含量是一致的。在 SiO₂ 与主量的相关图中(图 6), 随着 SiO₂ 含量的增加, MgO, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃^T, CaO, Na₂O 的含量降低。同时, 研究区红山石英闪长玢岩和花岗斑岩的主量元素含量分别与普朗印支期复式岩体(任江波等, 2011a) 和热林燕山期花岗

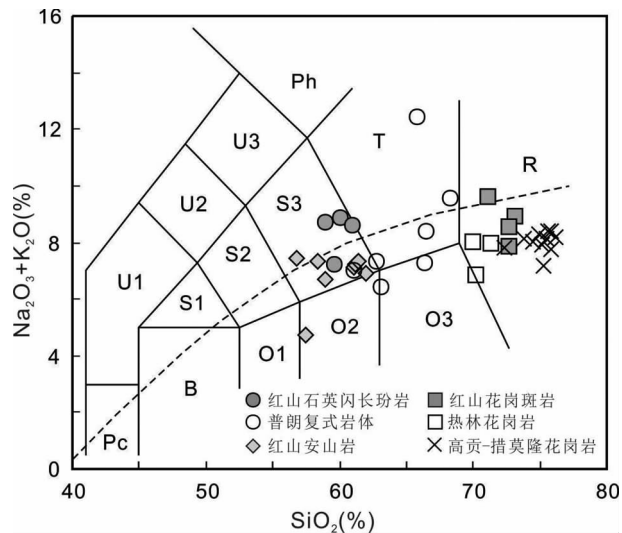


图5 中甸岛弧印支期与燕山晚期岩浆岩 TAS 图(据 Le Bas, 1986)

数据来源: 普朗复式岩体, 任江波等 (2011a); 红山安山岩, 任江波 (2011); 热林花岗岩, 尹光候等 (2009); 高贡-措莫隆花岗岩, 侯增谦等 (2001); 红山石英闪长玢岩与红山花岗岩, 本研究。PC-苦橄玄武岩; B-玄武岩; U1-碧玄岩和碱玄岩; U2-响岩质碱玄岩; U3-碱玄质响岩; O1-玄武安山岩; O2-安山岩; O3-英安岩; S1-粗面玄武岩; S2-玄武粗安岩; S3-粗安岩; T-粗面岩; R-流纹岩

Fig. 5 TAS diagram for Indosinian and Late Yanshanian lavas in Zhongdian arc (after Le Bas, 1986)

岩(尹光候等, 2009)有着相似的分布特征和变化趋势。与红山安山岩相比, 石英闪长玢岩具有更高的 K_2O (前者为 0.47% ~ 3.67%, 后者为 3.32% ~ 5.55%), 可能是后期热液蚀变作用对安山岩进行了改造(烧失量为 3.12% ~ 5.95%), 降低了 K_2O 的含量(图 4b)。

4.4 微量元素

红山石英闪长玢岩与花岗斑岩具有相似的稀土配分模式(图 7a), 呈右倾式, 为轻稀土富集型, 但花岗斑岩相对石英闪长玢岩轻稀土(LREE)和重稀土(HREE)分异更明显(前者 $42.0 < (La/Yb)_N < 66.4$, 后者 $18.7 < (La/Yb)_N < 21.4$), 并且 LREE 分异更明显(前者 $7.5 < (La/Sm)_N < 8.6$, 后者 $4.8 < (La/Sm)_N < 5.2$), HREE 无明显分异。石英闪长玢岩 Eu 显示无至微弱的负异常(δEu 为 0.70 ~ 0.93), 花岗斑岩 Eu 负异常较明显(δEu 为 0.63 ~ 0.81)。

在微量元素蛛网图(图 7b)中, 石英闪长玢岩和花岗斑岩均显示富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素(HFSE)。石英闪长玢岩 Sr 有微弱正异常, 这与其无明显的 Eu 负异常是一致的; 花岗斑岩具有明显 Sr 负异常, 较明显的 Eu 负异常和更明显的 Ti 负异常。石英闪长玢岩具有高 Sr ($801 \times 10^{-6} \sim 1003 \times 10^{-6}$)、低 Y (16×10^{-6})

~ 20×10^{-6}), 以及高 Sr/Y (49 ~ 54) 的特点; 花岗斑岩具有相对低 Sr ($126 \times 10^{-6} \sim 185 \times 10^{-6}$)、更低 Y ($8 \times 10^{-6} \sim 13 \times 10^{-6}$), 以及低 Sr/Y (12 ~ 16) 的特点。石英闪长玢岩和花岗斑岩分别与普朗印支期复式岩体和热林燕山晚期花岗岩有一致的演化特征。

5 讨论

5.1 红山地区岩浆活动

5.1.1 红山印支期岩浆活动

晚三叠纪, 甘孜-理塘洋壳向西低角度俯冲, 在中甸岛弧靠近乡城-格咱深大断裂处发生 SN 向较狭窄的拗陷, 在原中-下三叠统浅-中海相沉积物之上, 发育了一套巨厚的碎屑岩、碳酸盐岩及火山岩系。俯冲造山晚期, 以闪长玢岩-二长斑岩为主体的岩枝、岩瘤、岩脉或岩床, 大多数顺层间裂隙侵入到上三叠统中火山岩发育的曲嘎寺组和图姆沟组(杨岳清等, 2002)。

近年来, 对中甸岛弧(如普朗、雪鸡坪、春都、烂泥塘、松诺等地区)的印支期浅成-超浅成中酸性岩石开展了大量的年代学和地球化学研究(曾普胜等, 2003, 2006; 李文昌, 2007; 林清茶等, 2006; 王守旭等, 2008; 冷成彪等, 2008; 李文昌等, 2009; 庞振山等, 2009; 张兴春等, 2009)。早期年代学研究结果显示岛弧内成矿斑岩有着不同的形成时代, 并将其划分为东、西斑岩带(曾普胜等, 2003, 2004; 李文昌等, 2010)。任江波等(2011b)结合近几年高精度锆石年代学研究, 认为印支期中酸性岩体呈面状分布, 年龄范围集中在 223 ~ 211Ma, 峰值年龄为 215.5Ma, 中甸岛弧的印支期形成的东、西成矿斑岩带没有明显的时代差异。

红山地处中甸岛弧中部, 由于地表出露的岩体较少, 红山岩体的成岩时代一直缺少精确的年龄数据。前人获得石英二长斑岩的全岩 Rb-Sr 模式年龄为 214Ma(云南省地质矿产局, 1990), 但由于 Rb-Sr 体系容易受后期热事件的影响而置信度不高。本研究采得红山 0901 号钻孔岩芯中段的石英闪长玢岩, 玢岩中的锆石颗粒自形程度较好, 具有明显的振荡环带结构, Th/U 值均很高(0.90 ~ 3.03), 为典型的岩浆成因锆石, 因此锆石 U-Pb 年龄 216.1 ± 3.2 Ma 可以代表石英闪长玢岩的成岩时代。

对近几年中甸岛弧中酸性侵入岩体的成岩时代统计结果显示(图 8a), 红山中酸性岩浆的侵入时间处于岛弧岩浆活动的高峰期(~215Ma), 与中甸岛弧中酸性侵入岩体均没有明显的时代差异, 说明它们可能属于同一构造作用的产物。现阶段研究认为义敦岛弧花岗岩浆活动的高峰期为 ~215Ma, 岛弧火山岩高峰期为 228 ~ 213Ma, 甘孜-理塘洋俯冲时期为 237 ~ 206Ma(侯增谦等, 2001, 2004), 因此, 中甸岛弧中酸性侵入岩体都是印支期甘孜-理塘洋向西俯冲时候的产物。

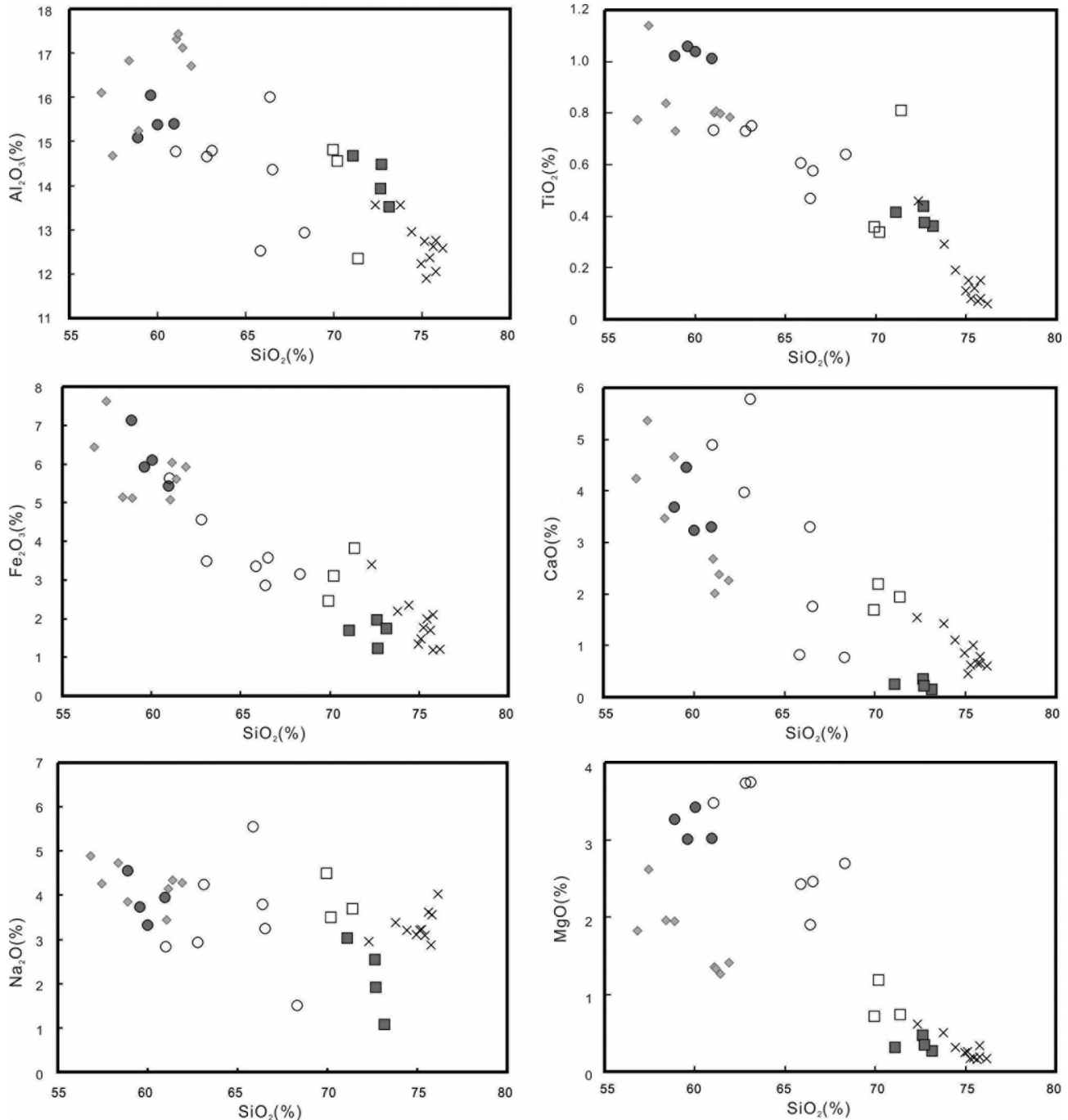


图6 中甸岛弧印支期与燕山晚期岩浆岩 Harker 图
数据来源和图例同图5

Fig. 6 Harker diagram for Indosinian and Late Yanshanian lavas in Zhongdian arc

5.1.2 红山燕山期岩浆活动

三叠纪之后,在中甸弧中沉积的上三叠统,伴随甘孜-理塘洋的彻底闭合,在东西两侧挤压应力作用下发生了碰撞造山作用,并产生了花岗岩浆侵入活动(杨岳清等, 2002)。代表性花岗岩岩体出露在休瓦促和热林地区,岩性为黑云母二长花岗斑岩,形成了石英脉型和蚀变花岗岩型 W-Mo 矿床。近年来,在红山矿区深部隐伏的石英二长斑岩-花岗斑岩体

也引起了研究者的关注,认为在红山矿区除发育与印支期石英二长斑岩有关的矽卡岩型铜多金属成矿系统外,矿区深部可能还发育与燕山期岩浆活动有关的热液石英脉型矿体(周维全等,1976; 谭雪春等, 1985; 徐兴旺等, 2006; 王新松等, 2011)。

目前对于中甸地区燕山期中酸性岩体的年代学工作开展较少,初步的研究结果显示:休瓦促黑云母二长花岗岩

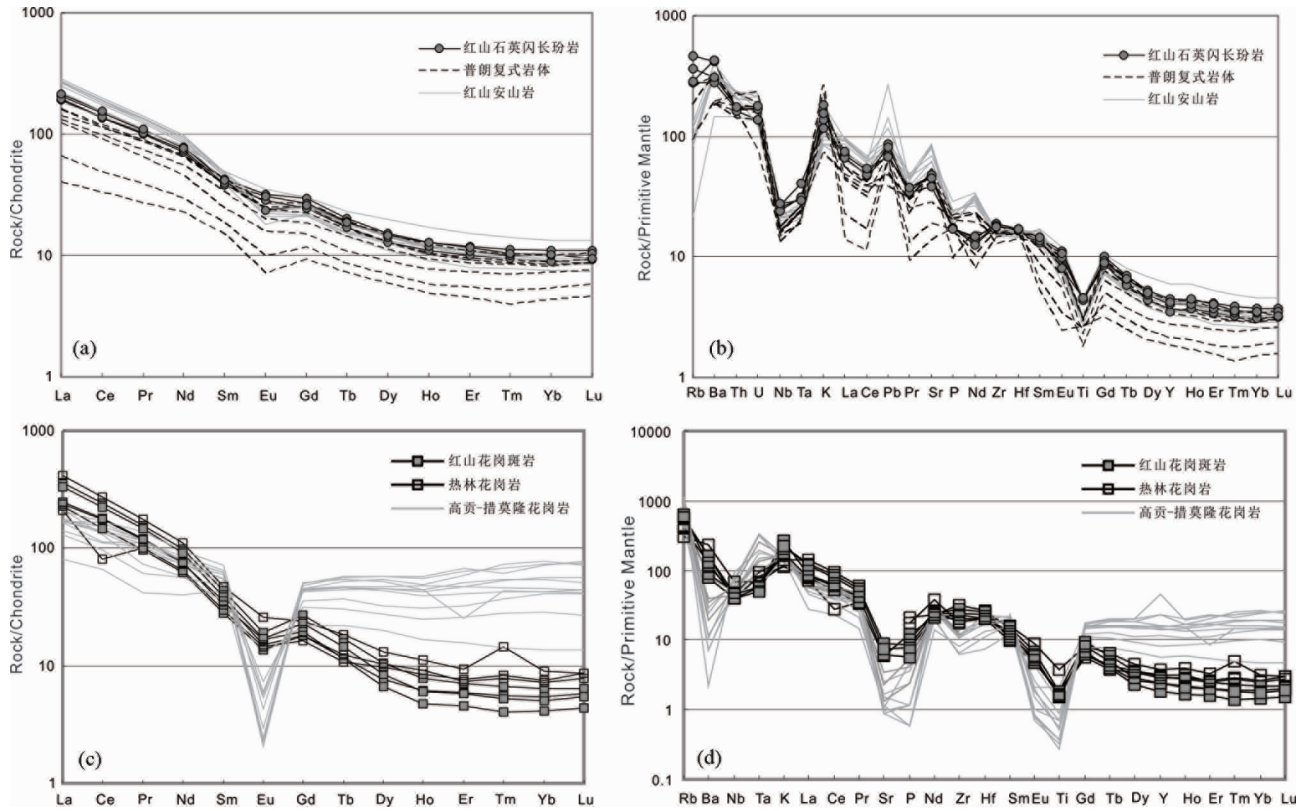


图7 球粒陨石标准化配分 REE 图(a, c)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b, d) (标准化数据为 Sun and McDonough, 1989)

数据来源同图4

Fig.7 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) (normalized values after Sun and McDonough, 1989)

的 Rb-Sr 等时线年龄为 88.3Ma (侯增谦等, 2001); 热林黑云母二长花岗岩的 Rb-Sr 年龄为 80.4Ma (谭雪春等, 1985), 黑云母二长花岗岩中黑云母³⁹Ar-⁴⁰Ar 坪年龄为 82.01 ± 0.86Ma (尹光候等, 2009)。王新松等(2011)首次在红山矿区发现了燕山晚期的花岗斑岩, 其锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄为 81.1 ± 0.5Ma。

本研究采得红山 0901 号钻孔岩芯下段的花岗斑岩, 岩石中典型岩浆成因锆石的 U-Pb 年龄为 75.8 ± 1.3Ma, 代表了其成岩年龄。义敦岛弧燕山晚期造山后伸展环境下的花岗岩浆侵入活动集中在 75 ~ 95Ma, 且显示出自北向南依次发育的趋势, 高峰期在 ~ 80Ma (图 8b)。红山位于义敦岛弧带的南端, 花岗斑岩的年龄较北部岩体年轻, 接近燕山晚期岩浆活动峰值, 与中甸地区热林、休瓦促岩体的成岩时代相一致, 表明其形成于义敦岛弧燕山晚期造山后伸展阶段。在红山斑岩型矿体中辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄为 77 ± 2Ma (徐兴旺等, 2006), 与花岗斑岩的成岩时代在误差范围内非常接近, 表明成岩与成矿作用是同期的。

在红山同一钻孔岩芯中获得的石英闪长玢岩和花岗斑岩的年代学信息表明, 在红山地区发育有甘孜-理塘洋向西俯冲环境下和造山后伸展环境下的两期中酸性岩浆侵入活

动, 并且因此形成了与两期岩浆活动密切相关的两套成矿作用, 即矽卡岩型铜多金属成矿作用和花岗斑岩型成矿作用。

5.2 岩石成因

5.2.1 红山印支期石英闪长玢岩

红山石英闪长玢岩形成于印支期甘孜-理塘洋向西俯冲时期, 地球化学性质与普朗复式岩体具有相似性, 以富集大离子亲石元素, 强烈亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素为特征, 也具有埃达克岩质岩的部分地球化学特征, 如较高的 SiO₂ (>59%), Sr 含量 (801 × 10⁻⁶ ~ 1003 × 10⁻⁶), 较高的 Sr/Y 比值 (49 ~ 54), 较低的 Y (16 × 10⁻⁶ ~ 20 × 10⁻⁶), Yb (1.53 × 10⁻⁶ ~ 1.85 × 10⁻⁶), 轻重稀土分异明显 (18.7 < (La/Yb)_N < 21.4), 无明显的 Eu 负异常 (图 7a), 暗示其形成过程与俯冲板片有关。

但是, 与直接由洋壳熔融形成的典型埃达克岩 (Defant and Drummond, 1990) 相比, 红山石英闪长玢岩 Sr、HREE、Y 偏高, 且 (La/Yb)_N、(Dy/Ho)_N 偏低, 说明其岩浆源区或分异的岩浆房中可能不含斜长石, 不含或含有少量的石榴子石残留相或结晶相, 含有角闪石残留相或结晶相。在 Y-Sr/Y 和

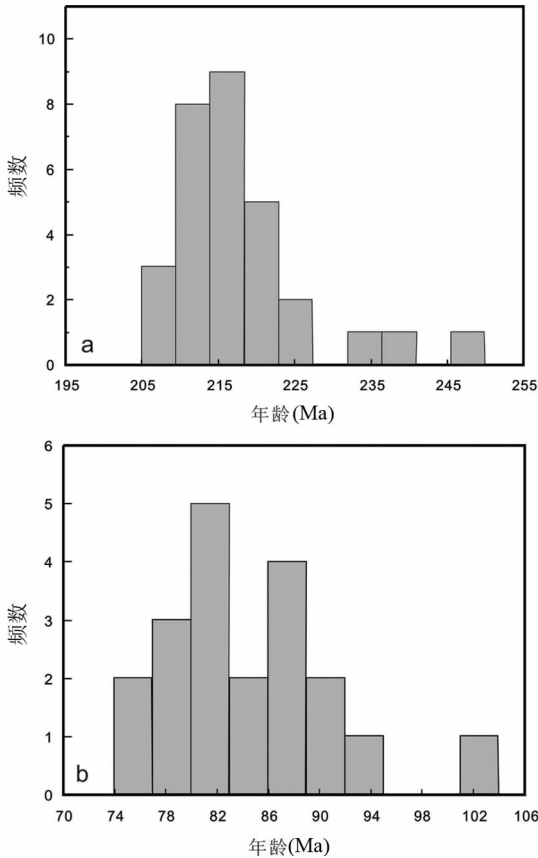


图8 中甸岛弧印支期中酸性侵入岩年龄分布图(a)和义敦岛弧燕山晚期期中酸性侵入岩年龄分布图(b)
数据来源: 侯增谦等, 2001; 任江波, 2011; 尹光候等, 2009; 王新松等, 2011; 本研究

Fig. 8 Cumulative age spectra of Indosinian intermediate-acid intrusive rocks in Zhongdian arc (a) and Late Yanshanian intermediate-acid intrusive rocks in Yidun Island arc (b)

(Yb)_N-(La/Yb)_N图(图9)中, 红山石英闪长玢岩落入埃达克岩与正常的岛弧安山岩-英安岩-流纹岩系列(ADRs)的过渡区域, 这与因角闪石结晶分异而呈现埃达克岩亲和性的大多数岛弧岩浆类似(Richards and Kerrich, 2007)。同时, 红山石英闪长玢的 MgO 和 Mg[#] 较高(3.01% < MgO < 3.42%, 48 < Mg[#] < 53), Rb/Sr 值为 0.18 ~ 0.37, 具有较高的 Cr (85 × 10⁻⁶ ~ 140 × 10⁻⁶, 平均值为 103 × 10⁻⁶) 和 Ni (18 × 10⁻⁶ ~ 26 × 10⁻⁶, 平均值为 22 × 10⁻⁶) 含量, 显示其为壳-幔混合源。最新研究成果表明, 普朗-雪鸡坪成矿斑岩可能是在甘孜-理塘洋西向低角度俯冲增生的构造背景下, 洋壳发生断裂, 软流圈沿板片窗上升导致前期被俯冲流体交代的地幔楔物质发生部分熔融形成的(陈建林等, 2011)。红山石英闪长玢岩与普朗-雪鸡坪成矿岩体有着相似的地球化学特征, 指示二者可能有着相似的物质源区和成岩模式。因此, 红山石英闪长玢岩可能并不是直接源于洋壳的部分熔融(图

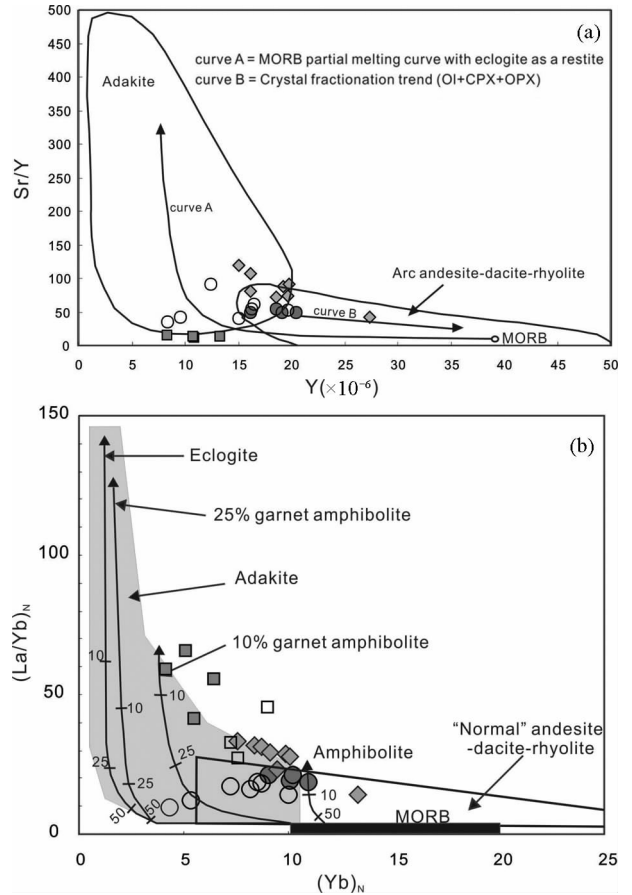


图9 中甸岛弧印支期与燕山晚期岩浆岩 Sr/Y vs. Y (a, 据 Defant *et al.*, 2002) 和 (La/Yb)_N vs. (Yb)_N 图 (b, 据 Defant and Drummond, 1990; Petford and Atherton, 1996)

数据来源和图例同图5

Fig. 9 Sr/Y vs. Y (a, after Defant, 2002) and (La/Yb)_N vs. (Yb)_N (b, after Defant and Drummond, 1990; Petford and Atherton, 1996) diagrams for Indosinian and Late Yanshanian lavas in Zhongdian arc

10), 而是被板片流体交代的地幔楔, 在随后的构造改造过程中发生部分熔融, 并经历了 MASH 过程的产物(Hildreth and Moorbath, 1988)。源自交代地幔楔富水的岛弧钙碱性岩浆可能发生了斑晶或副矿物相(角闪石、榍石、磷灰石、锆石)结晶分异, 特别是角闪石的分异和部分石榴子石的分异, 同时由于岩浆富水而抑制了斜长石的结晶, 使得红山石英闪长玢岩表现出埃达克岩质岩的部分地球化学特征(Richards and Kerrich, 2007; Castillo, 2006)。

5.2.2 红山燕山期花岗斑岩

高贡-措莫隆花岗岩带是义敦岛弧内第二条较大规模的花岗岩带, 发育于 101 ~ 76Ma, 高峰期处于 90Ma, 为典型的形成于造山后伸展作用的 A 型花岗岩(侯增谦等, 2001)。红山花岗斑岩与热林花岗岩作为中甸地区燕山晚期的代表性

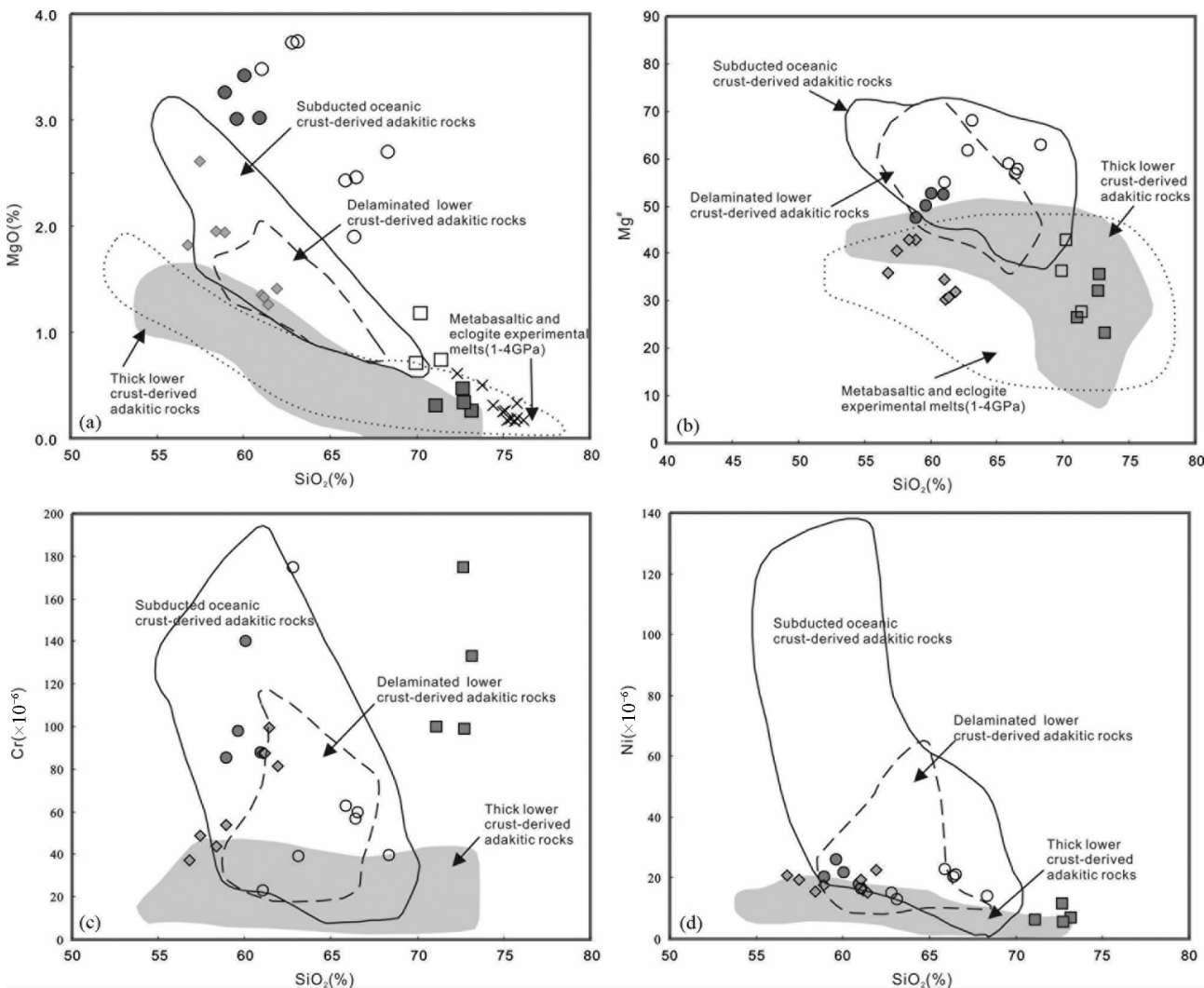


图 10 中甸岛弧印支期与燕山晚期岩浆岩 SiO₂ vs. MgO 图(a, 据 Huang *et al.*, 2009)、SiO₂ vs. Mg[#]图(b, 据 Wang *et al.*, 2006)、SiO₂ vs. Cr 图(c, 据 Huang *et al.*, 2009)和 SiO₂ vs. Ni 图(d, 据 Huang *et al.*, 2009)

数据来源和图例同图 5

Fig. 10 SiO₂ vs. MgO (a, after Huang *et al.*, 2009), SiO₂ vs. Mg[#] (b, after Wang *et al.*, 2006), SiO₂ vs. Cr (c, after Huang *et al.*, 2009) and SiO₂ vs. Ni (d, after Huang *et al.*, 2009) diagrams for Indosinian and Late Yanshanian lavas in Zhongdian arc

岩体,其地球化学特征与高贡-措莫隆 A 型花岗岩却有很大差异(图 5、图 6、图 7)。

红山花岗斑岩具有高的 SiO₂ 含量(71.1% ~ 73.2%)、Rb/Sr 比值(1.8 ~ 3.1)和 Th/U 比值(3.1 ~ 5.2), Mg[#] (< 36)较低,暗示其很可能源于地壳的熔融。同时样品富钾相对贫钠,在 SiO₂-K₂O 图(图 4a)中,落在钾玄岩区域中,这与其高的钾长石和黑云母含量是一致的。而由于后期蚀变作用对 K₂O 的改造,这种高钾的特征可能并不能完全代表源区的性质,只能推测花岗斑岩可能来自于一个相对富钾的地壳源区。

相对红山石英闪长玢岩,花岗斑岩的 Sr 含量较低(126 × 10⁻⁶ ~ 185 × 10⁻⁶),但是具有更低的 Y (8 × 10⁻⁶ ~ 13 ×

10⁻⁶),在 Y-Sr/Y 图中落入埃达克岩以下的区域,靠近榴辉岩部分熔融演化线(图 8a);具有更低的 Yb (0.7 × 10⁻⁶ ~ 1.09 × 10⁻⁶),轻重稀土分异更明显(42.0 < (La/Yb)_N < 66.4),在 (Yb)_N-(La/Yb)_N 图中落入埃达克岩或者埃达克岩以上的区域,处于 10% 石榴石角闪岩部分熔融演化线附近。在稀土图中,重稀土较平坦,表明岩浆源区有角闪石残留相(图 8b)。较低的 Sr 含量与较明显的 Eu 负异常(δEu 为 0.63 ~ 0.81)说明源区也有富 Ca 的斜长石存在,使熔融的岩浆贫 Ca, Sr (Hollocher *et al.*, 2002)。因此其残留相可能由斜长石 + 辉石 + 角闪石 ± 石榴子石组成,具有深源高压高温的特点,暗示其可能形成于中下地壳(图 11a)。

本文推测,在燕山晚期伴随着碰撞造山作用的结束,中甸地区地壳发生伸展和减薄,软流圈地幔上升和玄武质岩浆

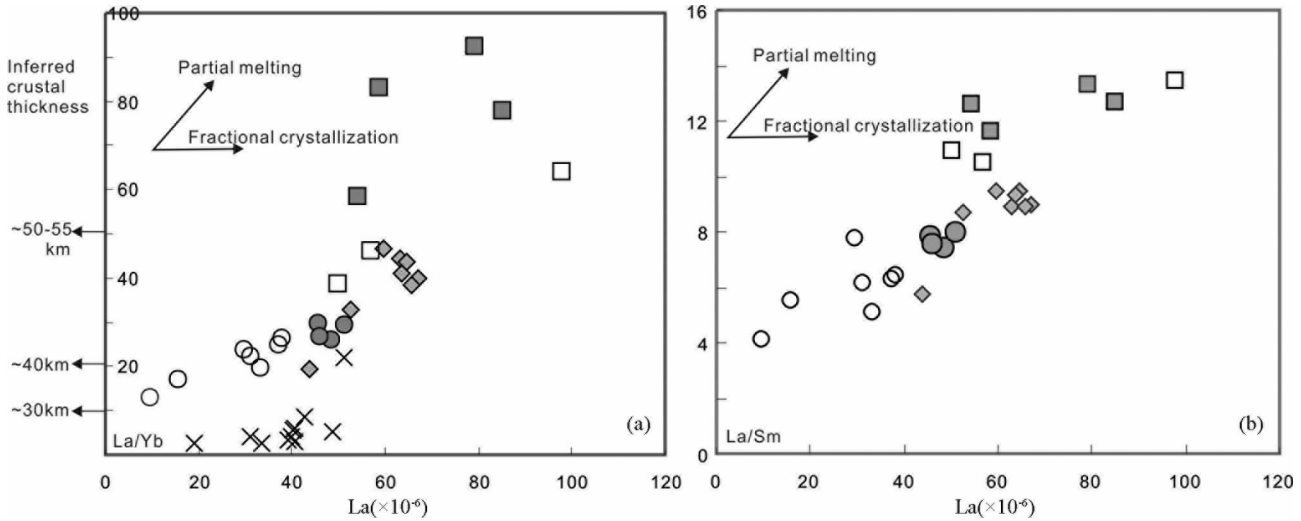


图 11 中甸岛弧印支期与燕山晚期岩浆岩 La/Yb vs. La 图(a, 据 Chung *et al.*, 2009) 和 La/Sm vs. La 图(b) 数据来源和图例同图 5

Fig. 11 La/Yb vs. La diagram (a, after Chung *et al.*, 2009) and La/Sm vs. La diagram (b) for Indosinian and Late Yanshanian lavas in Zhongdian arc

的底侵,诱发了大规模的中、下地壳的熔融和壳幔物质交换(侯增谦等, 2004)。在红山地区,中下地壳部分熔融生成的富钾的钙碱性岩浆侵入位于地壳浅部形成了花岗斑岩。而在高贡-措莫隆地区,则由于岩浆起源的地壳深度和源岩不一样,形成了典型的 A 型花岗岩(侯增谦等, 2001)。

6 结论

通过研究,本文得到以下结论:

(1) 红山地区的确存在印支期和燕山晚期两期岩浆活动和与之相关的成矿作用,它们分别形成于 214 ~ 216Ma 和 76 ~ 81Ma。

(2) 红山地区燕山期花岗斑岩及其成矿形成于造山后伸展环境。

致谢 云南省地质调查局李文昌教授和张世权高级工程师在样品采集等野外工作中给予了大量指导与帮助,杨志明副研究员对本文提出了宝贵的修改意见和建议,笔者在此一并表示衷心感谢。

References

Bureau of Geology and Mineral Resources of Yunnan Province. 1990. Regional Geology of Yunnan Province. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 728 (in Chinese)

Castillo PR. 2006. Petrogenesis review of adakite. Chinese Science Bulletin, 51(6): 617 - 627 (in Chinese)

Chen JL, Xu JF, Wang BD *et al.* 2010. Origin of Cenozoic alkaline potassic volcanic rocks at KonglongXiang, Lhasa terrane, Tibetan Plateau: Products of partial melting of a mafic lower-crustal source?

Chemical Geology, 273(3 - 4): 286 - 299

Chen JL, Xu JF, Ren JB *et al.* 2011. Geochemical differences between the subduction- and collisional-type ore-bearing porphyric. Acta Petrologica Sinica, 27(9): 2733 - 2742 (in Chinese with English abstract)

Chung SL, Chu MF, Ji JQ *et al.* 2009. The nature and timing of crustal thickening in Southern Tibet: Geochemical and zircon Hf isotopic constraints from post-collisional adakites. Tectonophysics, 477(1 - 2): 36 - 48

Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 347(6294): 662 - 665

Defant MJ, Xu JF and Kepezhinskas P. 2002. Adakites: Some variations on a theme. Acta Petrologica Sinica, 18(2): 129 - 142

Hildreth W and Moorbath S. 1988. Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile. Contributions to Mineralogy and Petrology, 98(4): 455 - 489

Hollocher K, Bull J and Robinson P. 2002. Geochemistry of the metamorphosed Ordovician Taconian magmatic arc, Bronson Hill anticlinorium, western New England. Physics and Chemistry of the Earth, 27(1 - 3): 5 - 45

Hou ZQ, Qu XM, Zhou J *et al.* 2001. Collision-orogenic process of the Yidun arc in the Sanjiang Region: Record of granites. Acta Geologica Sinica, 75(4): 484 - 497 (in Chinese with English abstract)

Hou ZQ, Yang YQ, Qu XM *et al.* 2004. Tectonic evolution and mineralization systems of the Yidun Arc Orogen in Sanjiang Region, China. Acta Geologica Sinica, 78(1): 109 - 120 (in Chinese with English abstract)

Huang XL, Xu YG, Lan JB *et al.* 2009. Neoproterozoic adakitic rocks from Mopanshan in the western Yangtze Craton: Partial melts of a thickened lower crust. Lithos, 112(3 - 4): 367 - 381

Le Bas MJ, Le Maitre RW, Streckeisen A *et al.* 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. Journal of Petrology, 27(3): 745 - 750

Leng CB, Zhang XC, Wang SX *et al.* 2008. Shrimp zircon U-Pb dating of the Songnuo ore-hosted porphyry, Zhongdian, Northwest Yunnan, China and its geological implication. Geotectonica et Metallogenia, 32(1): 124 - 130 (in Chinese with English abstract)

Li Q. 2009. Porphyry characteristics and metallogenic significance of

- Pulang porphyry copper deposit. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geoscience (in Chinese with English summary)
- Li WC. 2007. The tectonic evolution of the Yidun island arc and the metallogenic model of the Pulang porphyry copper deposit, Yunnan, SW China. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geoscience (in Chinese with English summary)
- Li WC, Yin GH, Lu YX *et al.* 2009. The evolution and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic evidence of the Pulang Complex in Zhongdian. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1421 – 1429 (in Chinese with English abstract)
- Li WC, Yin GH, Lu YX *et al.* 2010. Delineation of Hongshan-Shudu opiolite melange in Geza volcanic-magmatic arc and its significance, southwest "Jinsha-Lancang-Nu rivers". *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1661 – 1671 (in Chinese with English abstract)
- Lin QC, Xia B and Zhang YQ. 2006. Zircon shrimp U-Pb dating of the syn-collision Xuejiping quartz diorite porphyrite in Zhongdian, Yunnan, China, and its geological implication. *Geological Bulletin of China*, 25(1–2): 133 – 137 (in Chinese with English abstract)
- Liu YS, Hu ZC, Gao S *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chem. Geol.*, 257(1–2): 34 – 43
- Liu YS, Gao S, Hu Z *et al.* 2010. 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 of mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537 – 571
- Ludwig KR. 2003. ISOPLOT 3. 00; A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. California; Berkeley Geochronology Center
- Pang ZS, Du YS, Wang GW *et al.* 2009. Single-grain zircon U-Pb isotopic ages, geochemistry and its implication of the Pulang complex in Yunnan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 159 – 165 (in Chinese with English abstract)
- Peccerillo A and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63 – 81
- Petford N and Atherton M. 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: The Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37(6): 1491 – 1521
- Ren JB. 2011. The chronology, geochemistry and mineralization significance of porphyry copper deposits in Zhongdian island arc. Master Degree Thesis. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English summary)
- Ren JB, Xu JF, Chen JL *et al.* 2011a. Geochemistry and petrogenesis of Pulang porphyries in Sanjiang region. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(4): 581 – 592 (in Chinese with English abstract)
- Ren JB, Xu JF, Chen JL *et al.* 2011b. Study on zircon geochronology of porphyries in Zhongdian Arc. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2591 – 2599 (in Chinese with English abstract)
- Richards JP and Kerrich R. 2007. Special paper, Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Economic Geology*, 102(4): 537 – 576
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Oceanic Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313 – 345
- Wang Q, Xu JF, Jian P *et al.* 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 47(1): 119 – 144
- Wang SX, Zhang XC, Leng CB *et al.* 2007. A tentative study of ore geochemistry and ore-forming mechanism of Pulang porphyry copper deposit in Zhongdian, northwestern Yunnan. *Mineral Deposits*, 26(3): 277 – 288 (in Chinese with English abstract)
- Wang SX, Zhang XC, Leng CB *et al.* 2008. Zircon shrimp U-Pb dating of Pulang porphyry copper deposit, northwestern Yunnan, China: The ore-forming time limitation geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 24: 2313 – 2321 (in Chinese with English abstract)
- Wang XS, Bi XW, Leng CB *et al.* 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of granite porphyry in the Hongshan Cu-polymetallic deposit, Zhongdian, Northwest Yunnan, China and its geological implication. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(3): 315 – 321 (in Chinese with English abstract)
- Williams IS, Buick A and Cartwright I. 1996. An extended episode of Early Mesoproterozoic metamorphic fluid flow in the Reynold Region, central Australia. *J. Metamorph. Geol.*, 14(1): 29 – 47
- Xu XW, Cai XP and Qu WJ. 2006. Later Cretaceous granitic porphyritic Cu-Mo mineralization system in the Hongshan area, Northwestern Yunnan and its significances for tectonics. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1422 – 1433 (in Chinese with English abstract)
- Yang YQ, Hou ZQ, Huang DH *et al.* 2002. Collision orogenic process and magmatic metallogenic system in Zhongdian arc. *Acta Geoscientica Sinica*, 23(1): 17 – 24 (in Chinese with English abstract)
- Yin GH, Li WC and Jiang CX. 2009. The evolution of Relin uplex rock masses in Yanshan Period and Ar-Ar dating age and copper-molybdenum mineralization characteristics of Zhongdian volcanic-magma arc. *Geology and Prospecting*, 45(4): 385 – 394 (in Chinese with English abstract)
- Zeng PS, Mo XX, Yu XH *et al.* 2003. Porphyries and porphyry copper deposit in Zhongdian arc, northwestern Yunnan. *Mineral Deposits*, 22(4): 393 – 400 (in Chinese with English abstract)
- Zeng PS Wang HP, Mo XX *et al.* 2004. Tectonic setting and prospects of porphyry copper deposits in Zhongdian island arc belt. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(5): 535 – 540 (in Chinese with English abstract)
- Zeng PS, Li WC, Wang HP *et al.* 2006. The Indosinian Pulang superlarge porphyry copper deposit in Yunnan, China; Petrology and Chronology. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 989 – 1000 (in Chinese with English abstract)
- Zhang XC, Leng CB, Yang CZ *et al.* 2009. Zircon SIMS U-Pb isotopic age and its significance of ore-bearing porphyry of Chundu porphyry copper deposit in Zhongdian, northwestern Yunnan. *Acta Mineralogica Sinica*, (Suppl. 1): 359 – 360 (in Chinese with English abstract)
- Zhou WQ, Zhou QQ and Li YF. 1976. Mineralization Geological Characteristics of Skarn Copper Deposits of Geza, Yunnan. Beijing: Geological Publishing House, 104 – 119 (in Chinese)

附中文参考文献

- Castillo PR. 2006. 埃达克岩成因回顾. *科学通报*, 51(6): 617 – 627
- 陈建林, 许继峰, 任江波等. 2011. 俯冲型和碰撞型含矿斑岩地球化学组成的差异. *岩石学报*, 27(9): 2733 – 2742
- 侯增谦, 曲晓明, 周继荣等. 2001. 三江地区义敦岛弧碰撞造山过程: 花岗岩记录. *地质学报*, 75(4): 484 – 497
- 侯增谦, 杨岳清, 曲晓明等. 2004. 三江地区义敦岛弧造山带演化和成矿系统. *地质学报*, 78(1): 109 – 120
- 冷成彪, 张兴春, 王守旭等. 2008. 滇西北中甸松诺含矿斑岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义. *大地构造与成矿学*, 32(1): 124 – 130
- 李建康, 李文昌, 王登红等. 2007. 中甸燕山晚期成矿事件的 Re-Os 定年及成矿规律研究. *岩石学报*, 23(10): 2415 – 2422
- 李青. 2009. 普朗斑岩铜矿床斑岩特征及其成矿意义. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学
- 李文昌. 2007. 义敦岛弧构造演化与普朗超大型斑岩铜矿成矿模型. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学
- 李文昌, 尹光候, 卢映祥等. 2009. 中甸普朗复式斑岩体演化及 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素依. *地质学报*, 83(10): 1421 – 1429

- 李文昌, 尹光候, 卢映祥等. 2010. 西南“三江”格咱火山-岩浆弧中红山-属都蛇绿混杂岩带的厘定及其意义. 岩石学报, 26(6): 1661-1671
- 林清茶, 夏斌, 张玉泉. 2006. 云南中甸地区雪鸡坪同碰撞石英闪长玢岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义. 地质通报, 25(1-2): 133-137
- 庞振山, 杜杨松, 王功文等. 2009. 云南普朗复式岩体锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征及其地质意义. 岩石学报, 25(1): 159-165
- 任江波. 2011. 中甸岛弧成矿斑岩和矿床的年代学和地球化学研究. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院
- 任江波, 许继峰, 陈建林等. 2011a. “三江”地区中甸弧普朗成矿斑岩地球化学特征及其成因. 岩石矿物学杂志, 30(4): 581-592
- 任江波, 许继峰, 陈建林等. 2011b. 中甸岛弧印支期斑岩矿床成矿斑岩的年代学及其构造意义. 岩石学报, 27(9): 2591-2599
- 王守旭, 张兴春, 冷成彪等. 2007. 滇西北中甸普朗斑岩铜矿床地球化学与成矿机理初探. 矿床地质, 26(3): 277-288
- 王守旭, 张兴春, 冷成彪等. 2008. 滇西北普朗斑岩铜矿锆石离子探针 U-Pb 年龄: 成矿时限及地质意义. 岩石学报, 24(10): 2313-2321
- 王新松, 毕献武, 冷成彪等. 2011. 滇西北中甸红山 Cu 多金属矿床花岗岩斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. 矿物学报, 31(3): 315-321
- 徐兴旺, 蔡新平, 屈文俊等. 2006. 滇西北红山晚白垩世花岗斑岩型 Cu-Mo 成矿系统及大地构造学意义. 地质学报, 80(9): 1422-1433
- 尹光候, 李文昌, 蒋成兴等. 2009. 中甸火山-岩浆弧燕山期热液复式岩体演化与 Ar-Ar 定年及铜铅矿化. 地质与勘探, 45(4): 385-393
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1-728
- 杨岳清, 侯增谦, 黄典豪等. 2002. 中甸弧碰撞造山作用和岩浆成矿系统. 地球学报, 23(1): 17-24
- 曾普胜, 莫宣学, 喻学惠等. 2003. 滇西北中甸斑岩及斑岩铜矿. 矿床地质, 22(4): 393-400
- 曾普胜, 王海平, 莫宣学等. 2004. 中甸岛弧带构造格架及斑岩铜矿前景. 地球学报, 25(5): 535-540
- 曾普胜, 李文昌, 王海平等. 2006. 云南普朗印支期超大型斑岩铜矿床: 岩石学及年代学特征. 岩石学报, (4): 989-1000
- 张兴春, 冷成彪, 杨朝志等. 2009. 滇西北中甸春都斑岩铜矿含矿斑岩的锆石 SIMS U-Pb 年龄及地质意义. 矿物学报, (S1): 359-360
- 周维全, 周其勤, 李云飞. 1976. 云南格咱夕卡岩型铜矿成矿地质特征. 北京: 地质出版社, 104-119