

跨越中甸弧到扬子地块西缘的 ~80Ma 中酸性火成岩成因及其对碰撞后成矿的意义*

谈荣钰^{1,2} 陈建林^{1,3**} 许继峰^{1,3,4} 黄文龙^{1,2} 唐婉丽^{1,2}

TAN RongYu^{1,2}, CHEN JianLin^{1,3**}, XU JiFeng^{1,3,4}, HUANG WenLong^{1,2} and TANG WanLi^{1,2}

1. 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, 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101

4. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Science, Beijing 100101, China

4. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2017-11-07 收稿, 2018-03-24 改回.

Tan RY, Chen JL, Xu JF, Huang WL and Tang WL. 2018. Petrogenesis of the ca. 80Ma felsic-intermediate magmatism in the Zhongdian arc terrane and western Yangtze block: Implications for post-collisional metallogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 34(5):1413–1426

Abstract The Relin Mo-Cu deposit and Tongchanggou Mo polymetallic deposit located in the Zhongdian arc which is the southern part of the Yidun arc of Sanjiang Tethys Region. Mineralization is closely associated with the Relin monzonitic granites and Tongchanggou granodiorite-porphyry, which were formed at 79.0 ± 1.4 Ma and 81.3 ± 1.1 Ma, respectively, according to LA-ICPMS zircon U-Pb dating. Geochemically, the Relin and Tongchanggou rocks have high SiO_2 ($>65\%$) and Al_2O_3 (13.74% ~ 14.91%), low MgO (0.86% ~ 1.49%) and $\text{Mg}^\#$ (36.3 ~ 47.3), and affinity of adakitic rocks given their high Sr (326×10^{-6} ~ 1174×10^{-6}), Sr/Y (22 ~ 86) and La/Yb (30 ~ 70) ratios, and low Y (10.2×10^{-6} ~ 15.6×10^{-6}) and Yb (1.00×10^{-6} ~ 1.51×10^{-6}). These geochemical characters indicate that the Relin and Tongchanggou rocks were derived from partial melting of the thickened lower continental crust within garnet as residual minerals. Additionally, our zircon U-Pb dating reveals that the Dali granites in the western Yangtze block were formed at 76.4 ± 2.3 Ma, indicating that the Late Cretaceous magmatism are also developed in the western Yangtze block. We suggest that the western Yangtze block probably have the similar tectonic environment with the Zhongdian arc in the Late Cretaceous.

Key words Zhongdian arc; Western Yangtze block; Zircon U-Pb dating; Geochemistry; Late Cretaceous

摘要 热林钼铜矿床和铜厂沟钼多金属矿床位于西南三江特提斯构造域义敦弧南部的中甸弧。热林含矿二长花岗岩和铜厂沟含矿花岗岩闪长斑岩, 锆石 U-Pb 年龄分别为 79.0 ± 1.4 Ma 和 81.3 ± 1.1 Ma。岩石地球化学显示热林岩体和铜厂沟岩体具有高的 SiO_2 ($>65\%$)、 Al_2O_3 (13.74% ~ 14.91%) 和低的 MgO (0.86% ~ 1.49%) 含量和 $\text{Mg}^\#$ 值 (36.3 ~ 47.3), 同时也具有高的 Sr (326×10^{-6} ~ 1174×10^{-6})、低的 Yb (1.00×10^{-6} ~ 1.51×10^{-6}) 和 Y (10.2×10^{-6} ~ 15.6×10^{-6}) 含量以及较高的 Sr/Y (22 ~ 86)、La/Yb (30 ~ 70) 比值, 并富集大离子亲石元素和亏损高场强元素。这些特征表明热林和铜厂沟岩体具有明显的埃达克质岩特征, 很可能是以石榴石为稳定相的加厚下地壳部分熔融的结果。位于扬子西缘的大理花岗岩, 锆石 U-Pb 年龄为

* 本文受国家“973”项目(2015CB452602)、国家重点研发计划(2016YFC0600305)、国家自然科学基金项目(41373030、41573024)和中国地质调查局项目(1212011020000150011)联合资助。

第一作者简介: 谈荣钰, 男, 1992 年生, 博士生, 地球化学专业, E-mail: tanrongyu@gig.ac.cn

** 通讯作者: 陈建林, 男, 1971 年生, 副研究员, 主要从事青藏高原中-新生代火山岩等研究, E-mail: lzdxchen@gig.ac.cn

76.4 ± 2.3 Ma, 首次在扬子西缘证实有晚白垩世岩浆活动, 表明晚白垩世中酸性岩浆侵入活动已经跨越了中甸弧进入了扬子地块西缘。对比中甸弧及保山地块发育于晚白垩世的岩浆作用及其构造背景, 初步认为在燕山晚期, 扬子西缘很可能处于与中甸弧类似的伸展构造背景。

关键词 中甸弧; 扬子地块西缘; 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学; 晚白垩世

中图法分类号 P588.121; P597.3

中国西南三江构造-岩浆-成矿带是我国重要的铜、钼、铅等多金属成矿带, 其典型地区为位于三江地区义敦弧南部的中甸弧(杨岳清等, 2002; 侯增谦等, 2004; Wang *et al.*, 2014a, b); 一般认为义敦弧由印支期甘孜-理塘古特提斯洋西向俯冲而形成, 区内构造-岩浆活动强烈, 形成了一系列印支期矿床, 如普朗、雪鸡坪、红山等斑岩型 Cu 多金属矿床; 同时, 最近的研究表明, 中甸弧不仅有发育大规模印支期岩浆活动, 同时也发育一系列近南北(NS)向分布的燕山期岩浆以及与之相关的成矿作用, 如休瓦促岩浆热液矿床、热林石英脉型矿床、红山铜多金属矿床、铜厂沟斑岩型 Mo 多金属矿床。相对于人们对印支期岩浆及其成矿作用的研究(吕伯西等, 1993; 莫宣学等, 1993; 杨岳清等, 2002; 侯增谦等, 2001, 2003b; 曾普胜等, 2003, 2006; 林清茶等, 2006; 李文昌, 2007; 王守旭等, 2007; 李文昌等, 2009; 李青, 2009; 庞振山等, 2009; 任江波, 2011; 任江波等, 2011a, b; 黄肖潇等, 2012; Deng *et al.*, 2014a, b; 曹康等, 2014; Cao *et al.*, 2016), 燕山期岩浆与成矿作用研究显得明显不足, 如均局限于对单个矿床的研究(李文昌等, 2012; 余海军等, 2015; Wang *et al.*, 2014a, b; Xiang *et al.*, 2014; Yu *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2017)。考虑到研究区在燕山期已经属于陆内环境, 那么, 燕山期岩浆-成矿作用在时空分布上是否仅仅局限于中甸弧地区, 还是跨越了中甸弧并具有连续性, 目前尚不清楚。基于以上问题, 本文试图在梳理前人研究成果的基础上, 结合我们对中甸弧和扬子西缘大理地区的中酸性岩石的年代学和地球化学的研究成果, 探讨中甸弧及其周缘燕山期岩浆-成矿分布特征, 进而对中甸弧和扬子西缘燕山期的岩浆-成矿作用的区域演化加以约束。

1 区域地质概况

义敦弧是印支期甘孜-理塘古特提斯洋西向俯冲作用形成的一个岛弧, 其东部、西部和南部分别以甘孜-理塘缝合带、金沙江缝合带和扬子板块西缘为界(Hou, 1993; Yang *et al.*, 2017)(图1)。前人根据区域地理位置和构造背景演化将义敦弧分为南北两段, 北为昌台弧, 由于甘孜-理塘洋俯冲角度较陡, 构造背景以张性为主, 形成了呷村式块状硫化物矿床(VMS)(侯增谦等, 2003a; 曹康等, 2014; 余海军等, 2015; Cao *et al.*, 2016); 南为中甸弧, 俯冲角度较缓, 构造背景以压性为主, 形成了岛弧斑岩及斑岩型铜矿床(曾普胜等, 2003; 曹康等, 2014; 余海军等, 2015; Cao *et al.*, 2016)。

中甸弧向西以近南北向的乡城-格咱断裂为界, 东以甘

孜-理塘缝合带为界, 南以扬子西缘为界。中甸弧作为义敦弧南段部分, 基本保留了义敦弧的构造演化特征, 即经历了印支期俯冲造山、燕山期碰撞造山及喜山期陆内汇聚三个阶段, 相应发育了三期岩浆活动, 如印支期广泛发育了以岛弧型钙碱性为主的岩浆岩和燕山期少量的以中酸性为主以及喜山期以正长岩-二长岩为主的侵入岩(侯增谦等, 2001, 2003b)。同时与之相对应, 发育了一系列与岩浆同期的成矿作用, 如印支期的普朗、红山、雪鸡坪等斑岩型矿床, 燕山期的热林、铜厂沟、红山等矿床。

热林钼铜矿床位于中甸弧东北缘热林背斜轴部附近。矿区内主要出露有上三叠统含火山岩的图姆沟组(T_3t^2)和曲嘎寺组(T_3q^3)地层, 并且矿区构造活动强烈, 断裂和褶皱大量发育, 控制了地层的分布及岩体的侵入深度; 矿区岩浆岩分布广泛, 侵入岩主要为燕山晚期二长花岗斑岩, 还有少量的喜山期二长花岗斑岩及印支期石英二长斑岩; 矿体大多赋存于二长花岗斑岩内(尹光候等, 2009; 魏超, 2017; 杨富成等, 2017; Gao *et al.*, 2017)。燕山期含矿二长花岗岩体呈北西(NW)向展布, 主要分布于矿区东部; 出露面积约6.5 km², 岩体长约1~4 km, 宽约0.6~3.4 km, 呈岩株、岩枝状侵入于图姆沟组砂岩、板岩中, 围岩具角岩化。岩性主要为浅灰白色, 呈似斑状结构, 块状构造, 斑晶和基质为显晶质, 主要有斜长石(25%~30%) + 石英(25%~30%) + 钾长石(25%~30%) + 黑云母(~10%)为主。斜长石呈半自形-自形板条状, 发育聚片双晶; 石英他形粒状, 钾长石呈半自形板状, 局部可见大颗粒钾长石斑晶, 达1~2 cm; 黑云母半自形片状, 少量绿泥石化。副矿物组合为锆石 + 独居石 + 磷灰石。

燕山期铜厂沟 Mo 多金属矿床位于中甸弧的南部边缘, 为义敦弧与甘孜-理塘缝合带及扬子板块西缘拗陷带的交汇处。矿区断裂、褶皱发育, NS 向的背斜纵贯矿区中部, 其中拉巴河断裂沿背斜轴部发育, 控制了矿区岩浆岩、斑岩型 Mo 多金属矿体的分布; 矿区主要出露地层为二叠系黑泥哨组(P_2h)的灰绿色、深灰色、灰黑色玄武岩以及三叠系北衙组(T_2b)的灰岩和大理岩, 黑泥哨组和北衙组为断层接触(余海军等, 2015)。含矿花岗闪长斑岩体多为浅成、超浅成侵入岩, 在地表仅有一些零散的并强烈风化成高岭土的露头出露。岩性主要为浅肉红色-灰白色, 斑状结构, 块状构造。斑晶粒径1~3 mm, 成分为斜长石(25%~45%)、黑云母(5%~10%)、石英约5%; 基质隐晶质结构, 由斜长石、黑云母、石英及暗色矿物组成(图2)。斜长石部分可见绢云母化, 角闪石部分可见绿泥石化, 副矿物为磷灰石 + 榍石 + 锆石。

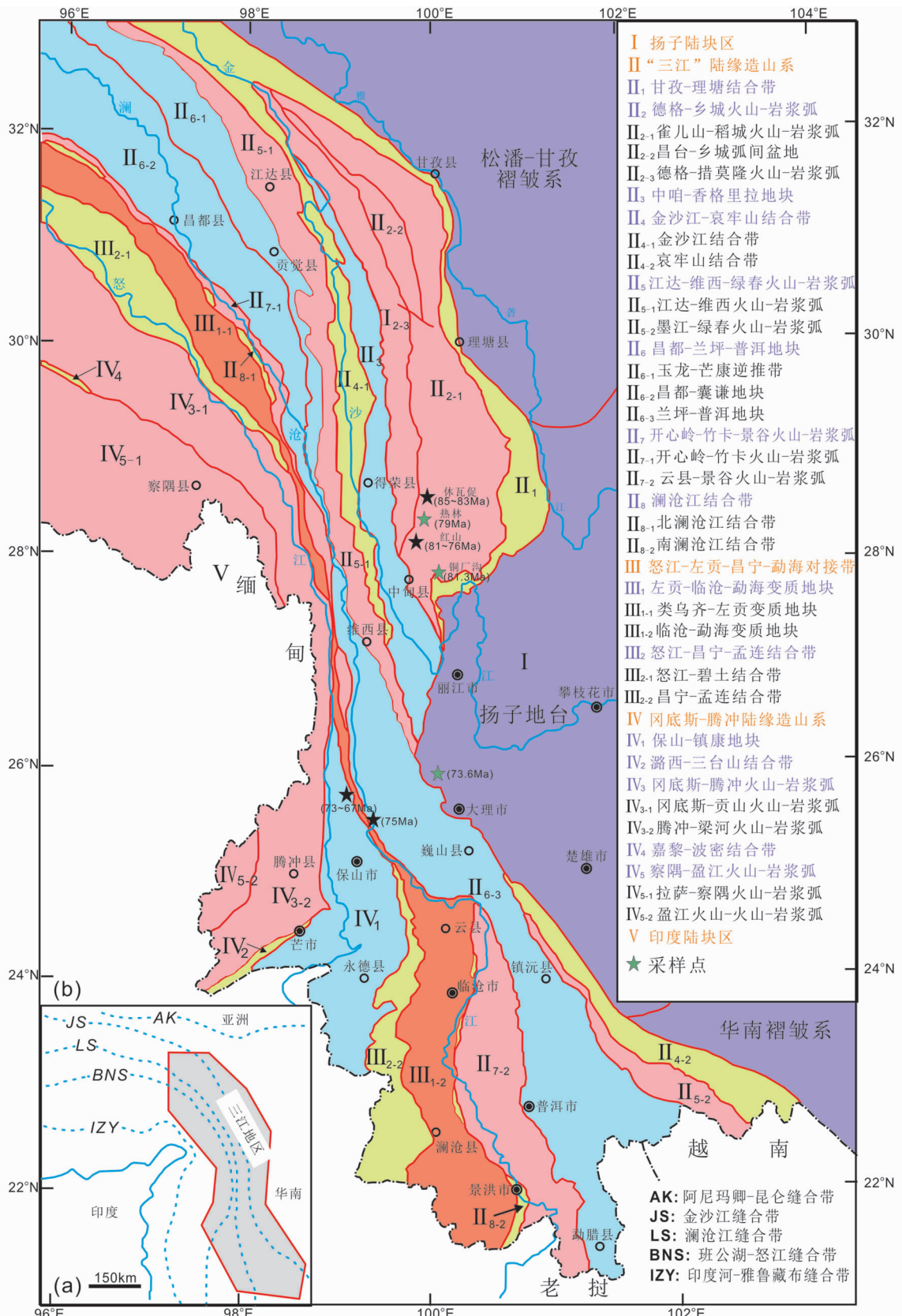


图1 青藏高原东部三江特提斯大地构造位置与框架 (据邓军等, 2012 修编)

Fig. 1 Geological map showing tectonic framework in eastern Tibet (modified after Deng *et al.*, 2012)

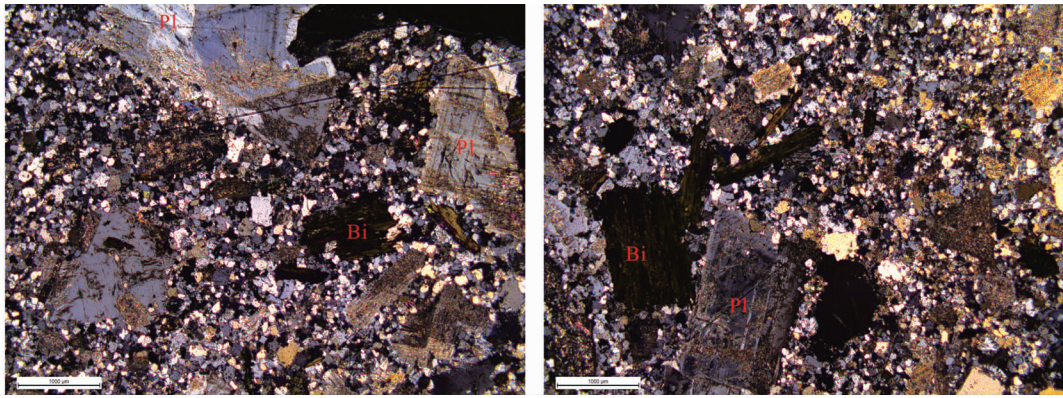


图2 铜厂沟岩体正交偏光显微照片(样品 0449-410)

Pl-斜长石;Bi-黑云母

Fig.2 Photomicrographs of the Tongchanggou rock (Sample 0449-410)

燕山期大理花岗岩体位于扬子板块西缘,大理市区北西方向约22km处。区域内近NS向断裂发育,沿断裂方向发育有花岗斑岩脉和辉绿岩脉,主要出露地层为二叠系(P_1)灰色石灰岩和泥盆系康廊组(D_1k)灰白色白云质灰岩、白云岩。岩体出露面积小于0.2km²,主要以岩脉、岩枝状产出。岩性为灰白色花岗岩,中细粒结构,块状构造;主要矿物为石英、钾长石和斜长石,次要矿物为黑云母,副矿物有锆石。石英主要呈无色,他形粒状;钾长石(40%~45%)和斜长石(25%~35%)均呈半自形-自形板状、长柱状,部分晶面浑浊。

2 样品与分析方法

本次研究所选样品均为蚀变较弱或新鲜的地表露头和钻孔岩芯,样品10RL-01采自热林矿区的钻孔ZK002岩芯;样品0449-365、0449-410、0449-518、0449-520和0449-523分别采自铜厂沟矿区的0449号钻孔岩芯,样品0451'462、0451'469和0451'494采自铜厂沟矿区0451'号钻孔岩芯,样品3201-338采自铜厂沟矿区3201号钻孔岩芯;样品16DL-08采自大理岩体露头。同时也采集热林钻孔岩芯中的2个样品(10RL-08、10RL-09)。对样品10RL-01、0449-410和16DL-08作了锆石U-Pb年代学研究。对分别采自热林和铜厂沟矿区的11件样品进行了主微量元素分析。

用于锆石U-Pb年代学定年的岩石样品,进行粗碎、淘洗后用传统重磁筛选法进行锆石分选,将挑选出的锆石粘在环氧树脂上制靶、抛光,然后进行阴极发光照相(CL图),选择未被破坏的锆石颗粒进行定年。锆石U-Pb定年分析在中国科学院广州地球化学研究所的激光剥蚀等离子质谱(LA-ICPMS)实验室完成。测试所用的激光剥蚀系统为193nm ArF-excimer激光器的GeoLas 2005,激光束直径为32μm,以He作为剥蚀物载气。分析数据的离线处理(包括对样品的空白和信号的选择、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, 2003)完成。

样品的主微量元素分析在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完成,选取新鲜的岩石样品,手工粉碎至1mm,用3%的HCl浸泡,然后用去离子水清洗烘干,烘干后的样品用玛瑙研钵碎至200目后用于化学分析。主量元素采用碱熔玻璃片法在Rigaku RIX 2000型X射线荧光光谱仪(XRF)上测试分析,分析精度优于5%,详细流程参见李献华等(2005);微量元素采用酸溶法在高温、高压下消减后,在Perkin-Elmer Sciex Elan 6000型电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)上完成测试分析,分析精度一般优于10%,详细流程参见李献华等(2002)。

3 分析结果

3.1 锆石U-Pb年龄

研究区3件样品的锆石U-Pb测试结果详见表1。

样品10RL-01(二长花岗岩)采自热林矿区。阴极发光图像(CL)显示,锆石自形程度较好,晶形大多为长柱状,长100~200μm,长宽比为2:1~4:1;发育明显的岩浆振荡环带;锆石的Th含量为 $185 \times 10^{-6} \sim 2156 \times 10^{-6}$,U含量为 $698 \times 10^{-6} \sim 2883 \times 10^{-6}$,Th/U比为0.12~1.17,属于典型的岩浆成因锆石(Williams *et al.*, 1996; 吴元保和郑永飞, 2004)。样品的13个分析点的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄集中在74.7~82.2Ma之间,所有分析点均在谐和线上或靠近谐和线分布(图3a),²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄的加权平均值为 79.0 ± 1.4 Ma(MSWD=1.9),代表了二长花岗岩的岩浆结晶年龄。

样品0449-410(花岗闪长斑岩)采自铜厂沟0449号钻孔岩芯410m处。阴极发光图像(CL)显示,锆石自形程度较好,晶形大多为长柱状,长100~250μm,长宽比为2:1~3:1;发育明显的岩浆振荡环带;锆石的Th含量为 $279 \times 10^{-6} \sim 1852 \times 10^{-6}$,U含量为 $688 \times 10^{-6} \sim 1245 \times 10^{-6}$,Th/U比为0.26~

表 1 热林、铜厂沟和大理岩体锆石 U-Pb 定年分析结果表

Table 1 U-Pb zircon dating results of Relin, Tongchanggou and Dali rocks

测点号	Th U		Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb (Ma)		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U (Ma)		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (Ma)	
	(×10 ⁻⁶)			比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	Age	1σ	Age	1σ	Age	1σ
10RL-01 二长花岗岩															
-01	702	2513	0.28	0.0513	0.0032	0.0877	0.0058	0.0123	0.0003	254	144	85.4	5.4	79.0	2.1
-02	1450	2347	0.62	0.0517	0.0036	0.0882	0.0062	0.0124	0.0003	272	166	85.8	5.8	79.1	1.7
-03	461	1654	0.28	0.0460	0.0029	0.0814	0.0052	0.0127	0.0003			79.4	4.9	81.6	2.0
-04	441	1644	0.27	0.0426	0.0031	0.0750	0.0055	0.0125	0.0003			73.4	5.2	79.8	1.8
-05	815	698	1.17	0.0461	0.0035	0.0794	0.0061	0.0123	0.0003	400	(228)	77.6	5.7	78.5	1.7
-06	430	1187	0.36	0.0432	0.0033	0.0755	0.0059	0.0126	0.0003			73.9	5.5	80.6	1.9
-07	988	2883	0.34	0.0472	0.0029	0.0808	0.0048	0.0122	0.0002	61	150	78.9	4.5	78.4	1.3
-08	214	855	0.25	0.0499	0.0039	0.0874	0.0066	0.0128	0.0003	191	170	85.0	6.1	82.2	2.0
-09	333	1954	0.17	0.0454	0.0030	0.0749	0.0050	0.0119	0.0003			73.3	4.8	76.2	1.7
-10	382	717	0.53	0.0523	0.0035	0.0916	0.0058	0.0127	0.0003	298	121	89.0	5.4	81.6	2.0
-11	618	2446	0.25	0.0524	0.0025	0.0917	0.0042	0.0126	0.0002	306	107	89.0	3.9	80.7	1.1
-12	2156	2298	0.94	0.0480	0.0024	0.0778	0.0040	0.0117	0.0002	98	111	76.1	3.7	74.7	1.5
-13	185	1578	0.12	0.0491	0.0031	0.0797	0.0047	0.0119	0.0003	154	146	77.8	4.4	76.5	1.8
0449-410 花岗闪长斑岩															
-01	744	1181	0.63	0.0482	0.0037	0.0852	0.0062	0.0129	0.0003	109	174	83.0	5.8	82.8	1.6
-02	279	1087	0.26	0.0568	0.0036	0.0964	0.0061	0.0122	0.0002	483	138	93.4	5.6	78.2	1.3
-03	779	1138	0.68	0.0492	0.0035	0.0866	0.0059	0.0127	0.0003	167	156	84.4	5.6	81.4	1.6
-04	603	1155	0.52	0.0474	0.0033	0.0822	0.0054	0.0127	0.0002	78	156	80.2	5.1	81.1	1.5
-05	371	688	0.54	0.0542	0.0038	0.0937	0.0062	0.0127	0.0003	376	157	91.0	5.8	81.5	1.7
-06	1852	1245	1.49	0.0574	0.0042	0.0979	0.0072	0.0123	0.0003	509	162	94.8	6.7	78.6	1.6
-07	351	916	0.38	0.0551	0.0041	0.0975	0.0071	0.0128	0.0002	417	167	94.4	6.6	81.7	1.5
-08	684	1005	0.68	0.0512	0.0034	0.0929	0.0063	0.0130	0.0003	250	156	90.2	5.8	83.2	1.6
-09	478	888	0.54	0.0553	0.0035	0.1026	0.0063	0.0132	0.0002	433	141	99.2	5.8	84.7	1.4
-10	542	786	0.69	0.0553	0.0046	0.0998	0.0078	0.0130	0.0003	433	185	96.6	7.2	83.1	1.6
-11	636	1035	0.61	0.0549	0.0041	0.0969	0.0069	0.0127	0.0003	409	169	93.9	6.4	81.6	1.8
-12	623	822	0.76	0.0543	0.0043	0.0967	0.0067	0.0132	0.0003	383	176	93.7	6.2	84.8	1.9
-13	323	736	0.44	0.0546	0.0041	0.0978	0.0064	0.0131	0.0003	394	169	94.7	5.9	83.9	1.9
-14	742	1125	0.66	0.0480	0.0031	0.0839	0.0053	0.0124	0.0002	102	154	81.8	5.0	79.5	1.4
-15	582	1013	0.58	0.0474	0.0040	0.0796	0.0065	0.0121	0.0002	78	180	77.7	6.1	77.5	1.5
-16	659	1140	0.58	0.0479	0.0032	0.0828	0.0053	0.0123	0.0002	95	161	80.8	5.0	78.6	1.4
-17	664	947	0.70	0.0481	0.0037	0.0893	0.0068	0.0132	0.0003	102	178	86.9	6.3	84.6	1.6
-18	355	794	0.45	0.0539	0.0044	0.0936	0.0072	0.0127	0.0003	369	185	90.8	6.7	81.5	1.7
-19	683	1239	0.55	0.0474	0.0030	0.0806	0.0049	0.0122	0.0002	78	139	78.8	4.6	78.1	1.2
-20	498	980	0.51	0.0464	0.0033	0.0817	0.0054	0.0128	0.0002	20	169	79.8	5.1	81.9	1.3
-21	493	694	0.71	0.0534	0.0039	0.0942	0.0063	0.0131	0.0003	343	167	91.4	5.9	83.7	1.9
-22	633	1071	0.59	0.0444	0.0029	0.0808	0.0052	0.0129	0.0002	20	176	78.9	4.9	82.9	1.5
16DL-08 花岗岩															
-01	119	183	0.65	0.0547	0.0030	0.0902	0.0049	0.0121	0.0002	398	122	87.7	4.6	77.8	1.3
-02	88	237	0.37	0.0490	0.0024	0.0810	0.0040	0.0121	0.0002	146	117	79.1	3.7	77.7	1.2
-03	86	208	0.41	0.0464	0.0025	0.0721	0.0038	0.0113	0.0001	20	126	70.7	3.6	72.4	0.9
-04	130	255	0.51	0.0465	0.0023	0.0725	0.0034	0.0116	0.0002	33	106	71.1	3.2	74.2	1.1
-05	147	330	0.45	0.0513	0.0024	0.0804	0.0037	0.0115	0.0002	257	110	78.5	3.5	73.8	1.0
-06	61	99	0.62	0.0658	0.0042	0.1002	0.0062	0.0113	0.0002	798	133	96.9	5.7	72.6	1.3
-07	112	220	0.51	0.0516	0.0026	0.0819	0.0042	0.0115	0.0001	265	115	79.9	4.0	74.0	0.9
-08	46	527	0.88	0.0491	0.0018	0.0812	0.0031	0.0120	0.0002	154	85	79.3	2.9	77.1	1.0
-09	632	778	0.81	0.0561	0.0016	0.0882	0.0030	0.0113	0.0001	457	65	85.8	2.8	72.6	0.8
-10	172	348	0.50	0.0612	0.0025	0.0942	0.0038	0.0112	0.0001	656	81	91.4	3.6	72.0	0.9
-11	77	270	0.29	0.0507	0.0025	0.0839	0.0042	0.0121	0.0002	233	119	81.8	3.9	77.7	1.1
-12	103	220	0.47	0.0492	0.0023	0.0802	0.0039	0.0119	0.0002	167	109	78.4	3.7	76.1	1.1

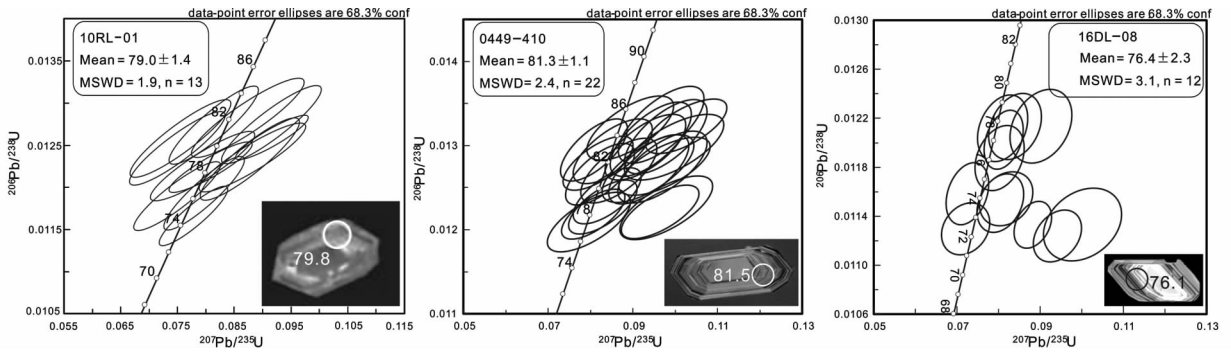


图3 热林(a)、铜厂沟(b)和大理(c)岩体锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 3 Concordia diagram of LA-ICP-MS zircon U-Pb data for the Relin (a), Tongchanggou (b) and Dali (c) rocks

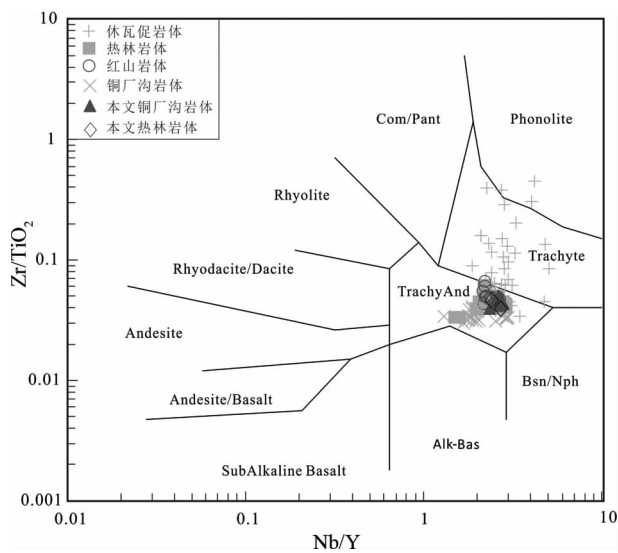


图4 铜厂沟岩体 Zr/TiO_2 - Nb/Y 岩石分类图解(据 Winchester and Floyd, 1977)

休瓦促岩体、热林岩体、红山岩体和铜厂沟岩体数据引自 Wang *et al.*, 2014a, b; 余海军等, 2015; 余海军和李文昌, 2016; Yang *et al.*, 2016, 2017; Gao *et al.*, 2017. 图5、图7、图8 数据来源同此图

Fig. 4 Zr/TiO_2 vs. Nb/Y diagram of Tongchanggou rocks (after Winchester and Floyd, 1977)

1.49, 属于典型的岩浆成因锆石 (Williams *et al.*, 1996; 吴元保和郑永飞, 2004)。样品的 22 个分析点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄集中在 77.5 ~ 84.8 Ma 之间, 所有分析点均在谐和线上或靠近谐和线分布 (图 3b), $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄的加权平均值为 81.3 ± 1.1 Ma (MSWD = 2.4), 代表了花岗闪长斑岩的岩浆结晶年龄。

样品 16DL-08 采自扬子西缘大理地区。阴极发光图像 (CL) 显示, 锆石自形程度较好, 晶形大多为板状、长柱状, 长 100 ~ 150 μm , 长宽比为 2 : 1 ~ 3 : 1; 发育明显的岩浆振荡环带; 锆石的 Th 含量为 $46 \times 10^{-6} \sim 632 \times 10^{-6}$, U 含量为 99 \times

$10^{-6} \sim 778 \times 10^{-6}$, Th/U 比为 0.29 ~ 0.88, 属于典型的岩浆成因锆石 (Williams *et al.*, 1996; 吴元保和郑永飞, 2004)。样品的 12 个分析点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄集中在 72.0 ~ 77.8 Ma 之间, 所有分析点均在谐和线上或靠近谐和线分布 (图 3c), $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄的加权平均值为 76.4 ± 2.3 Ma (MSWD = 3.1), 代表了花岗岩的岩浆结晶年龄。

3.2 全岩元素组成

热林二长花岗岩和铜厂沟花岗闪长斑岩体的主微量元素分析测试数据见表 2。考虑到样品采自铜厂沟矿区岩芯, 部分样品已经遭受轻微蚀变, 本文主要通过微量元素进行岩性分类, 如 Zr/TiO_2 - Nb/Y 图解 (图 4) 所示, 热林二长花岗岩和铜厂沟花岗闪长斑岩与中甸弧同时期休瓦促、热林、红山和铜厂沟岩体有着相似分布范围 (Wang *et al.*, 2014a, b; 余海军等, 2015; 余海军和李文昌, 2016; Yang *et al.*, 2016, 2017; Gao *et al.*, 2017)。如研究区的样品具有高的 SiO_2 (65.34% ~ 71.40%)、 Al_2O_3 (13.74% ~ 14.91%), 和较低的 MgO (0.86% ~ 1.49%) 含量以及低的 $Mg^{\#}$ 值 (36.3 ~ 47.3)。

热林二长花岗岩和铜厂沟花岗闪长斑岩在球粒陨石标准化的稀土元素配分图中 (图 5a) 显示轻重稀土元素分异明显 (La/Yb 为 30 ~ 70), 亏损重稀土元素 (HREEs) Yb ($1.00 \times 10^{-6} \sim 1.51 \times 10^{-6}$) 和 Y ($10.2 \times 10^{-6} \sim 15.6 \times 10^{-6}$)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图中 (图 5b) 显示出富集大离子亲石元素 (LILEs), 亏损高场强元素 (HFSE, 如 Ti)。

4 讨论

4.1 中甸弧及其扬子板块西缘燕山期岩浆与成矿作用

上面的分析结果显示, 中甸弧热林和铜厂沟的含矿二长花岗岩和花岗闪长斑岩分别形成于 79.0 ± 1.4 Ma 和 81.3 ± 1.1 Ma。他们分别与成矿区内热林辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄 81.2 ± 2.3 Ma (吕伯西等, 1993; 李建康等, 2007)、模式年龄 $84.3 \sim 81.3$ Ma (Gao *et al.*, 2017), 铜厂沟辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄 85.0 ± 2.0 Ma (吕伯西等, 1993; 李文昌等, 2012)、

表2 中甸弧热林、铜厂沟岩体主量(wt%)和微量($\times 10^{-6}$)分析结果Table 2 Major (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) analyzing results for Relin and Tongchanggou rocks in the Zhongdian arc

样品号	0449-365	0449-410	0449-518	0449-520	0449-523	0451'-462	0451'-469	0451'-494	3201-338	10RL-08	10RL-09
SiO ₂	67.57	67.33	66.48	65.34	66.22	67.36	67.02	68.79	67.85	70.22	71.40
TiO ₂	0.51	0.55	0.51	0.57	0.53	0.43	0.54	0.45	0.60	0.57	0.50
Al ₂ O ₃	14.75	14.43	14.87	14.76	14.91	14.23	14.12	13.74	14.51	13.93	13.79
Fe ₂ O ₃	3.77	3.57	3.87	4.50	4.51	3.64	3.65	3.15	2.96	3.34	2.95
MnO	0.11	0.07	0.11	0.14	0.14	0.12	0.10	0.08	0.12	0.06	0.06
MgO	1.35	1.47	1.19	1.49	1.38	1.04	1.42	1.14	1.33	1.05	0.86
CaO	2.81	2.62	2.71	3.09	2.58	2.13	2.63	2.20	2.92	1.82	1.59
Na ₂ O	3.93	3.55	3.94	3.95	4.24	3.33	3.42	3.08	2.93	3.09	3.21
K ₂ O	3.68	4.22	4.08	3.99	3.45	4.96	4.22	4.96	4.34	4.25	4.36
P ₂ O ₅	0.25	0.26	0.26	0.27	0.24	0.19	0.27	0.23	0.27	0.23	0.19
LOI	1.23	1.36	1.54	1.89	1.13	2.10	2.59	2.05	1.71	0.97	0.63
Total	99.95	99.44	99.55	99.98	99.33	99.54	99.98	99.89	99.54	99.53	99.53
Mg [#]	41.8	45.2	38.2	39.8	38.0	36.3	43.8	41.9	47.3	38.6	36.8
Sc	5.62	6.14	5.30	6.23	5.84	4.64	5.75	5.17	5.79	8.40	8.00
Ti	2588	3445	2556	2879	2707	2173	2744	2269	3821	3028	2649
V	43.1	53.2	43.6	50.6	48.6	34.6	45.8	37.3	44.7	57.0	45.0
Cr	20.6	13.4	20.4	24.1	28.6	19.3	25.9	11.8	10.5	12.9	11.4
Co	7.19	12.80	7.43	9.24	8.06	6.70	7.60	7.01	7.73	6.50	6.10
Ni	9.61	10.34	9.59	11.47	10.03	9.55	12.48	7.87	6.80	10.40	9.70
Cu	12.0	163	51.1	21.9	7.3	30.9	57.3	51.0	144	32.0	25.0
Zn	37.5	43.6	40.3	49.3	36.6	38.4	40.4	41.0	41.5	38.8	39.6
Rb	143	194	168	173	145	182	192	205	93.0	186	233
Sr	722	776	737	829	864	577	683	642	1174	326	368
Y	12.2	13.1	12.1	11.9	11.9	10.2	12.0	11.4	13.7	14.7	15.6
Zr	214	254	237	237	251	187	271	211	240	274	203
Nb	32.3	35.5	30.6	31.8	31.2	28.5	31.6	29.0	32.2	35.4	41.5
Ba	1178	1331	1664	1283	1061	1654	1073	1789	1461	637	539
La	67.7	77.1	61.7	78.2	74.1	51.4	68.0	61.3	64.3	46.5	45.8
Ce	113	130	108	127	123	91.6	118	107	116	84.2	83.1
Pr	11.1	12.5	10.6	12.1	11.8	9.1	11.5	10.5	11.4	8.8	8.7
Nd	36.3	40.7	36.1	38.9	38.0	29.8	37.7	35.0	39.0	28.8	28.7
Sm	5.31	5.99	5.40	5.47	5.40	4.44	5.46	5.04	5.92	4.70	4.80
Eu	1.32	1.42	1.37	1.32	1.37	1.14	1.34	1.28	1.49	1.00	0.92
Gd	4.36	4.84	4.21	4.36	4.44	3.65	4.56	4.29	5.08	4.16	4.23
Tb	0.48	0.55	0.51	0.49	0.51	0.42	0.51	0.48	0.58	0.55	0.57
Dy	2.51	2.73	2.61	2.52	2.48	2.12	2.53	2.32	2.84	2.70	2.90
Ho	0.46	0.50	0.47	0.47	0.47	0.40	0.47	0.44	0.54	0.50	0.52
Er	1.23	1.32	1.23	1.19	1.19	1.04	1.23	1.15	1.37	1.42	1.46
Tm	0.17	0.18	0.17	0.17	0.18	0.15	0.18	0.17	0.19	0.22	0.22
Yb	1.16	1.21	1.13	1.12	1.12	1.00	1.17	1.09	1.24	1.37	1.51
Lu	0.18	0.18	0.17	0.18	0.18	0.16	0.18	0.17	0.19	0.22	0.24
Hf	5.45	5.81	5.94	5.82	5.71	5.16	6.21	5.46	5.60	7.15	5.73
Ta	2.00	2.21	2.16	2.06	1.99	1.99	1.96	1.90	2.04	2.82	3.92
Pb	22.3	22.6	17.8	15.9	14.8	21.3	18.4	20.2	14.9	20.2	22.3
Th	23.4	23.0	22.6	24.7	23.5	22.1	22.9	22.8	17.8	31.7	35.3
U	6.90	7.80	6.82	7.74	6.96	9.47	5.98	5.96	3.86	8.70	8.31

表3 中甸弧燕山晚期成岩成矿同位素年龄

Table 3 Late Yanshanian diagenetic and metallogenic isotopic dates from the Zhongdian arc

岩体	岩性	测试对象	测试方法	年龄 (Ma)	资料来源	
休瓦促	含矿石英脉	辉钼矿	Re-Os	86.7 ± 2.1 ~ 85.8 ± 2.6	吕伯西等, 1993	
	黑云二长花岗斑岩	辉钼矿	Re-Os	83.0 ± 1.0	吕伯西等, 1993	
	含矿石英脉	辉钼矿	Re-Os	83.0 ± 1.0	侯增谦等, 2003b	
	黑云二长花岗斑岩	辉钼矿	Re-Os	83.0 ± 1.0	李建康等, 2007	
	黑云母花岗斑岩	锆石	U-Pb	85.6 ± 0.5	Wang <i>et al.</i> , 2014a	
	二长花岗岩	锆石	U-Pb	84.8 ± 0.6	Wang <i>et al.</i> , 2014a	
	碱长花岗岩	锆石	U-Pb	84.4 ± 1.4	Wang <i>et al.</i> , 2014a	
	二长花岗岩	锆石	U-Pb	83.6 ± 0.3	余海军和李文昌, 2016	
热林	黑云二长花岗岩	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	82.0 ± 0.9	吕伯西等, 1993	
	黑云二长花岗岩	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	82.0 ± 0.9	尹光候等, 2009	
	黑云二长花岗斑岩	辉钼矿	Re-Os	81.2 ± 2.3	吕伯西等, 1993	
	黑云二长花岗斑岩	辉钼矿	Re-Os	81.2 ± 2.3	李建康等, 2007	
	石英脉、蚀变花岗岩	辉钼矿	Re-Os	81.3 ~ 84.3	Gao <i>et al.</i> , 2017	
	二长花岗斑岩	锆石	U-Pb	82.7 ± 0.5	Wang <i>et al.</i> , 2014a	
	二长花岗斑岩	锆石	U-Pb	80.6 ± 0.3	Gao <i>et al.</i> , 2017	
	二长花岗斑岩	锆石	U-Pb	82.8 ± 0.3	Gao <i>et al.</i> , 2017	
	二长花岗斑岩	锆石	U-Pb	80.9 ± 0.3	Gao <i>et al.</i> , 2017	
	二长花岗斑岩	锆石	U-Pb	81.6 ± 0.5	Gao <i>et al.</i> , 2017	
	二长花岗斑岩	锆石	U-Pb	79.0 ± 1.4	本文	
	红山	含辉钼矿石英脉	辉钼矿	Re-Os	77.0 ± 2.0	吕伯西等, 1993
石英二长斑岩		辉钼矿	Re-Os	77.6 ± 1.1	吕伯西等, 1993	
石英二长斑岩		辉钼矿	Re-Os	80.2 ± 1.3	吕伯西等, 1993	
含辉钼矿石英脉		辉钼矿	Re-Os	77.0 ± 2.0	徐兴旺等, 2006	
石英二长斑岩		辉钼矿	Re-Os	77.6 ± 1.1	李文昌等, 2011	
石英二长斑岩		辉钼矿	Re-Os	80.2 ± 1.3	李文昌等, 2011	
花岗斑岩		锆石	U-Pb	81.1 ± 0.5	王新松等, 2011	
花岗斑岩		锆石	U-Pb	75.8 ± 1.3	黄肖潇等, 2012	
二长花岗斑岩		锆石	U-Pb	76.0 ± 0.8	Yang <i>et al.</i> , 2016	
二长花岗斑岩		锆石	U-Pb	77.0 ± 0.8	Yang <i>et al.</i> , 2016	
二长花岗斑岩		锆石	U-Pb	78.0 ± 0.5	Yang <i>et al.</i> , 2016	
二长花岗斑岩		锆石	U-Pb	79.0 ± 0.7	Yang <i>et al.</i> , 2016	
铜厂沟		辉钼矿	辉钼矿	Re-Os	85.0 ± 2.0	吕伯西等, 1993
		辉钼矿	辉钼矿	Re-Os	85.0 ± 2.0	李文昌等, 2012
	辉钼矿体	辉钼矿	Re-Os	85.2 ± 0.4	Yang <i>et al.</i> , 2017	
	矽卡岩辉钼矿	辉钼矿	Re-Os	86.8 ± 0.6	Yang <i>et al.</i> , 2017	
	石英-辉钼矿脉	辉钼矿	Re-Os	85.9 ± 0.8	Yang <i>et al.</i> , 2017	
	辉钼矿体	辉钼矿	Re-Os	86.3 ± 0.3	Yang <i>et al.</i> , 2017	
	含矿花岗闪长斑岩	锆石	U-Pb	84.6 ± 0.3	吕伯西等, 1993	
	黑云母二长花岗岩	锆石	U-Pb	86.3 ± 0.6	Wang <i>et al.</i> , 2014a	
	黑云母二长花岗岩	锆石	U-Pb	87.4 ± 0.6	Wang <i>et al.</i> , 2014a	
	花岗闪长斑岩	锆石	U-Pb	84.6 ± 0.3	余海军等, 2015	
	花岗闪长斑岩	锆石	U-Pb	84.7 ± 0.6	Yang <i>et al.</i> , 2017	
拉巴	花岗闪长斑岩	锆石	U-Pb	85.7 ± 0.5	Yang <i>et al.</i> , 2017	
	花岗闪长斑岩	锆石	U-Pb	81.3 ± 1.1	本文	
	花岗闪长斑岩	锆石	U-Pb	85.0 ± 2.0	Yu <i>et al.</i> , 2014	

模式年龄 86.8 ~ 85.2Ma (Yang *et al.*, 2017) 在误差范围内保持一致, 即成岩与成矿在同一时期, 说明热林 Cu-Mo 矿床、铜厂沟 Mo 多金属矿床, 其成矿作用均与燕山晚期的岩浆活动有关。且热林、铜厂沟矿床的成岩与成矿年龄与中甸弧北部的休瓦促 Mo-W 矿床 (休瓦促岩体的锆石 U-Pb 年龄 85.6 ~ 83.6Ma, Wang *et al.*, 2014a; 余海军和李文昌, 2016; 辉钼矿 Re-Os 等时性年龄 86.7 ~ 83.0Ma, 吕伯西等, 1993; 侯增

谦等, 2003a, b; 李建康等, 2007)、中甸弧南部的红山斑岩 Cu 矿床 (含矿花岗斑岩体的锆石 U-Pb 年龄 75.8 ~ 81.1Ma, 王新松等, 2011; 黄肖潇等, 2012; Yang *et al.*, 2016; 辉钼矿 Re-Os 等时性年龄 77.0 ~ 80.2Ma, 吕伯西等, 1993; 徐兴旺等, 2006; 李文昌等, 2011, 2012)、拉巴 Mo-Cu 多金属矿床 (花岗闪长斑岩的锆石 U-Pb 年龄 85.0 ± 2.0Ma, Yu *et al.*, 2014) 等在成岩与成矿时间上保持一致 (表 3、图 6), 指

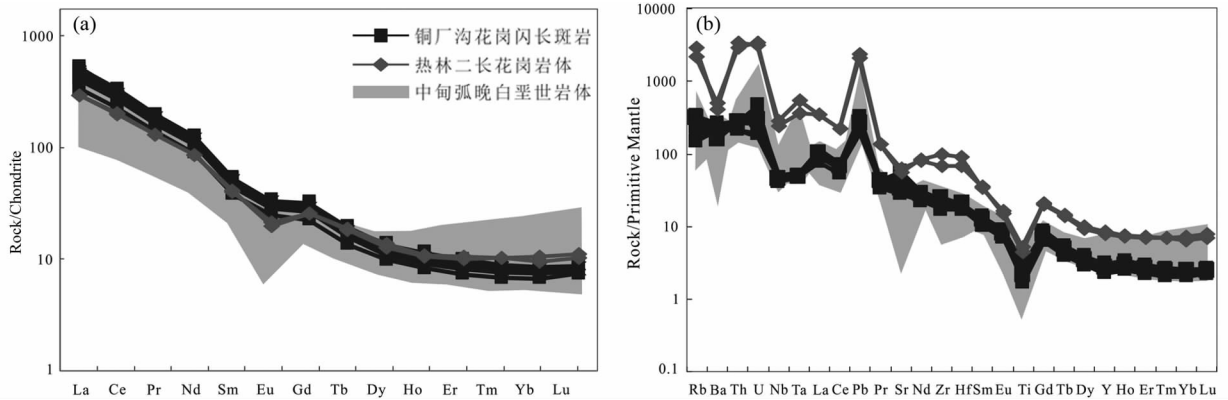


图5 球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(标准化值据 McDonough and Sun, 1995)

Fig. 5 Chondrite-normalized rare earth element distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams (b) of Tongchanggou rocks (normalization values after McDonough and Sun, 1995)

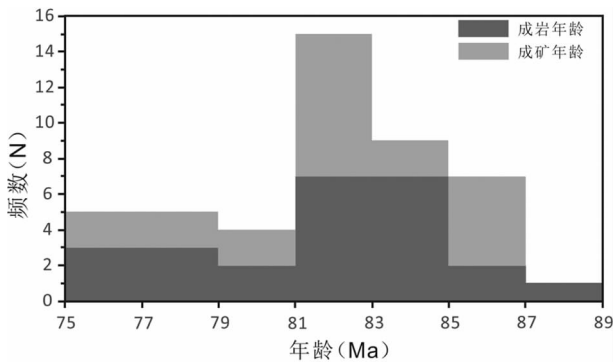


图6 中甸弧晚白垩世岩体年龄分布图

Fig. 6 Age spectrum of Late Cretaceous rocks in the Zhongdian arc

示中甸弧地区在燕山晚期发育了一期近 NS 向展布的岩浆活动,且与同时期区域上 Mo-Cu-W 成矿作用有关。

根据目前研究现状可知,穿过中甸弧往南进入扬子板块西缘,至今尚无燕山晚期岩浆活动的详细报道,仅在铜厂沟外围东炉房地区有燕山晚期岩浆作用并伴随有铜钼金矿化(余海军,私人通讯)。本研究中大理花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 73.6 ± 1.6 Ma,代表其成岩时代在燕山晚期,首次在扬子西缘证实存在燕山晚期岩浆活动,表明燕山晚期的岩浆作用不仅仅集中在中甸弧,而且已经跨越了中甸弧进入了扬子西缘。

4.2 岩石成因

如上所述,热林二长花岗岩和铜厂沟花岗闪长斑岩具有较高的 SiO_2 (>65%) 和 Al_2O_3 (13.74% ~ 14.91%) 含量,以及较低的 MgO (0.86% ~ 1.49%) 含量和 $\text{Mg}^\#$ 值 (36.3 ~ 47.3)。同时也具有高的 Sr (326×10^{-6} ~ 1174×10^{-6})、低的

Yb (1.00×10^{-6} ~ 1.51×10^{-6}) 和 Y (10.2×10^{-6} ~ 15.6×10^{-6}) 含量,以及较高的 Sr/Y (22 ~ 86) 和 La/Yb (30 ~ 70) 比值(图7),并亏损高场强元素。由此可见,热林二长花岗岩和铜厂沟花岗闪长斑岩具有类似于埃达克质岩的特征(Defant and Drummond, 1990; Martin *et al.*, 2005; Richards and Kerrich, 2007; Castillo, 2012; 许继峰等, 2014)。

通常认为,埃达克质岩石的形成主要有以下几种观点:(1)俯冲大洋板片的部分熔融(Thieblemont *et al.*, 1997; Oyarzun *et al.*, 2001; Mungall, 2002);(2)正常弧环境下幔源玄武质岩浆演化的混染-分离-结晶(AFC)过程(Castillo *et al.*, 1999; Macpherson *et al.*, 2006; Richards and Kerrich, 2007; Li *et al.*, 2009);(3)拆沉下地壳的部分熔融(Xu *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2006a);(4)加厚下地壳的部分熔融(Chung *et al.*, 2003; Hou *et al.*, 2004)。

义敦岛弧形成于晚三叠世甘孜-理塘古特提斯洋盆的西向俯冲,随后发生弧-陆碰撞,侏罗纪时期,义敦岛弧与松潘-甘孜地块板内岩浆的发育,表明该时期区内已经进入陆内环境(张能德和张怀举, 1993; 曲晓明等, 2003; 胡健民等, 2005; 赵永久等, 2007; Liu *et al.*, 2007; 王全伟等, 2008; Wang *et al.*, 2014a, b; Wu *et al.*, 2014),且 Wang *et al.* (2014a)研究表明,中甸弧晚白垩世弧岩浆岩具有比区域上拉萨地体等同期的弧岩浆岩更低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的值,说明中甸弧晚白垩世时期的热林和铜厂沟等岩体不可能形成于俯冲大洋板片的部分熔融。我们野外工作期间,在热林二长花岗岩体和铜厂沟花岗闪长斑岩体中并没有发现壳源捕掳体,而且截止目前中甸弧地区也没有晚白垩世玄武质岩浆作用的报道;同时 Yang *et al.* (2017)研究表明铜厂沟花岗闪长斑岩具有较低的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 比值及均一的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$,因此研究区晚白垩世岩体也并非幔源玄武质岩浆的 AFC 演化的结果。同源于拆沉下地壳部分熔融形成的埃达克质岩相比,热林和铜厂沟岩浆岩具有低的 MgO (0.86% ~ 1.49%)、 $\text{Mg}^\#$ 值 (36.3

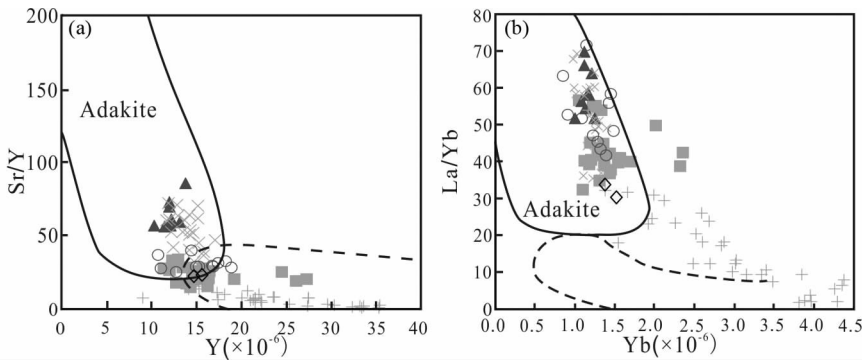


图7 铜厂沟岩体 Sr/Y-Y (a) 和 La/Yb-Yb (b) 图解 (据 Richards and Kerrich, 2007)

Fig. 7 Sr/Y vs. Y (a) and La/Yb vs. Yb (b) diagrams of Tongchanggou rocks (after Richards and Kerrich, 2007)

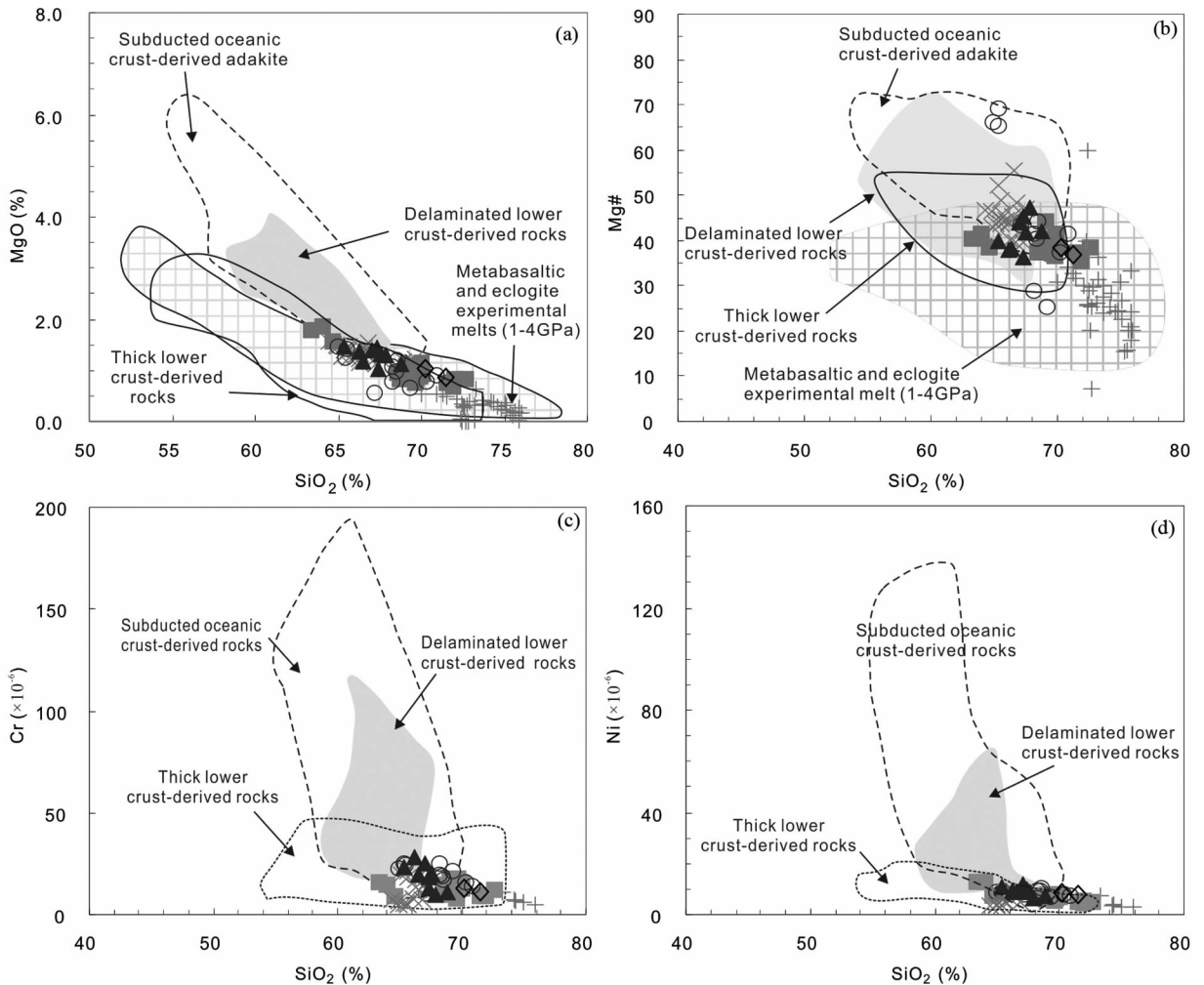


图8 铜厂沟岩体地球化学判别图解 (据 Wang *et al.*, 2006b)

MgO 含量(a)、Mg#值(b)、Cr 含量(c)和 Ni 含量(d) 与 SiO₂ 含量散点图

Fig. 8 Geochemical illustrations for Tongchanggou rocks (after Wang *et al.*, 2006b)

~47.3) 以及 Cr ($10.5 \times 10^{-6} \sim 28.6 \times 10^{-6}$)、Ni ($6.80 \times 10^{-6} \sim 12.5 \times 10^{-6}$) 含量, 表明其并非是源于拆沉下地壳, 而很可能为加厚下地壳部分熔融的产物 (图 8)。研究区样品微量元素 REE 配分图中显示出亏损 HREEs 和 Y, 指示热林和铜

厂沟岩体起源于含有石榴石的物质源区, 源区深度 > 30km (Rapp and Watson, 1995)。上述推论与研究区前人的研究结果相一致 (Wang *et al.*, 2014a, b; Yang *et al.*, 2016, 2017; Gao *et al.*, 2017; 余海军等, 2015; 余海军和李文昌,

2016)。

4.3 构造背景

如前所述,义敦岛弧是印支晚期甘孜-理塘古特提斯洋西向俯冲过程中形成的陆缘弧(Hou, 1993; 侯增谦等, 2003b; Yang *et al.*, 2017),在晚三叠世时期随着甘孜-理塘古特提斯洋的闭合,义敦岛弧与松潘-甘孜地块碰撞拼贴。在早侏罗纪时期(189~182Ma),义敦岛弧与松潘-甘孜地块板内长英质火山岩和A型花岗岩出现,表明该时期义敦岛弧已经处于板内伸展环境(张能德和张怀举, 1993; 曲晓明等, 2003; 胡健民等, 2005; 赵永久等, 2007; Liu *et al.*, 2007; 王全伟等, 2008; Wang *et al.*, 2014a, b; Wu *et al.*, 2014)。中甸弧作为义敦岛弧的南段部分,其时空演化具有义敦弧的特征。在Rb/30-Hf-3Ta构造判别图解中(图略),中甸弧晚白垩世休瓦促、热林、红山和铜厂沟岩体均落入晚-后碰撞花岗岩区域,表明区内晚白垩世岩体可能形成于晚-后碰撞构造环境(Wang *et al.*, 2014a, b; 余海军等, 2015)。即在晚白垩世前义敦岛弧可能发生地壳加厚,这与本研究中热林和铜厂沟岩体可能起源于加厚下地壳的部分熔融相一致。Wang *et al.* (2014a, b)认为,义敦弧晚白垩世埃达克质岩及相关的Cu-Mo-(W)成矿作用,可能形成于晚白垩世时期拉萨-羌塘地块的晚碰撞和后碰撞伸展环境。

最近的研究结果(Deng *et al.*, 2010, 2014a, b; Metcalfe, 2011, 2013; Zhu *et al.*, 2013; 禹丽等, 2014)也显示,晚白垩世时期,保山地块以西同样处于一个加厚地壳伸展的构造背景(Xu *et al.*, 2012)。本研究中的大理岩体,其大地构造位置位于扬子板块西缘,介于北部义敦弧和南部保山地块之间(图1);晚白垩世时期,该地区是否具有与中甸弧以及保山地块以西地区相似的构造背景? 此前,该地区尚未有任何有关晚白垩世时期岩浆活动的报道,本文首次在扬子西缘大理地区发现了晚白垩世岩浆作用,对证实该地区晚白垩世时期所处构造背景的推测提供了可能性,即晚白垩世时期扬子西缘也可能与中甸弧及保山地块类似,处于加厚地壳伸展构造背景,大理岩体可能是该伸展构造背景的产物,该地区也有可能发育与中甸弧类似的矿床。当然,这个推测的证实还需要开展更深入的研究工作。

5 结论

(1)中甸弧热林二长花岗岩、铜厂沟花岗闪长斑岩分别形成于 79.0 ± 1.4 Ma和 81.3 ± 1.1 Ma,与热林、铜厂沟矿床的矿化时间一致,表明热林、铜厂沟岩浆作用与热林、铜厂沟矿床的矿化作用有关;而大理花岗岩同样形成于晚白垩世时期(73.6 ± 1.6 Ma),与中甸弧晚白垩世时期发育的一期近NS向展布的岩浆活动时代一致,表明燕山晚期的岩浆作用已经跨越了中甸弧进入了扬子板块的西缘。

(2)铜厂沟和热林含矿岩体具有高的SiO₂、Sr和低的Yb

和Y含量以及高的Sr/Y、La/Yb比值,指示其具有埃达克质岩特征,可能为加厚下地壳部分熔融的结果。

(3)在燕山晚期,中甸弧以及扬子西缘晚白垩世岩浆作用指示其在该时期很可能处于同一构造背景。

References

- Cao K, Xu JF, Chen JL, Huang XX and Ren JB. 2014. Origin of porphyry intrusions hosting superlarge Pulang porphyry copper deposit in Yunnan Province; Implications for metallogenesis. *Mineral Deposits*, 33(2): 307–322 (in Chinese with English abstract)
- Cao K, Xu JF, Chen JL, Huang XX, Ren JB, Zhao XD and Liu ZX. 2016. Double-layer structure of the crust beneath the Zhongdian arc, SW China: U-Pb geochronology and Hf isotope evidence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 115: 455–467
- Castillo PR, Janney PE and Solidum RU. 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 33–51
- Castillo PR. 2012. Adakite petrogenesis. *Lithos*, 134–135: 304–316
- Chung SL, Liu DY, Ji JQ, Chu MF, Lee HY, Wen DJ, Lo CH, Lee TY, Qian Q and Zhang Q. 2003. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet. *Geology*, 31(11): 1021–1024
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662–665
- Deng J, Wang QF, Yang LQ, Wang YR, Gong QJ and Liu H. 2010. Delineation and explanation of geochemical anomalies using fractal models in the Heqing area, Yunnan Province, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 105(3): 95–105
- Deng J, Wang CM and Li GJ. 2012. Style and process of the superimposed mineralization in the Sanjiang Tethys. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1349–1361 (in Chinese with English abstract)
- Deng J, Wang QF, Li GJ, Li CS and Wang CM. 2014a. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China. *Gondwana Research*, 26(2): 419–437
- Deng J, Wang QF, Li GJ and Santosh M. 2014b. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China. *Earth-Science Reviews*, 138: 268–299
- Gao X, Yang LQ, Meng JY and Zhang LJ. 2017. Zircon U-Pb, molybdenite Re-Os geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf-O-S isotopic constraints on the genesis of Relin Cu-Mo deposit in Zhongdian, Northwest Yunnan, China. *Ore Geology Reviews*, 91: 945–962
- Hou ZQ. 1993. Tectono-magmatic evolution of the Yidun island-arc and geodynamic setting of Kuroko-type sulfide deposits in Sanjiang region, China. *Resource Geology*, 17: 336–350
- Hou ZQ, Qu XM, Zhou JR, Yang YQ, Huang DH, Lv QT, Tang SH, Yu JJ, Wang HP and Zhao JH. 2001. Collision-orogenic processes 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, Li YQ, Zhang QL and Qu XM. 2003a. End-members and mixing of fluids in submarine hydrothermal system: Evidence from fluid inclusions in the Baiyinchang and Gacun VMS deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 19(2): 221–234 (in Chinese with English abstract)
- Hou ZQ, Yang YQ, Wang HP, Qu XM, Lü QT, Huang DH, Wu XZ, Yu JJ, Tang SH and Zhao JH. 2003b. Collision-orogenic Processes and Mineralization Systems of the Yidun Arc. Beijing: Geological Publishing House, 1–345 (in Chinese)
- Hou ZQ, Gao YF, Qu XM, Rui ZY and Mo XX. 2004. Origin of adakitic intrusives generated during Mid-Miocene east-west extension

- in southern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(1–2): 139–155
- 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)
- Hu JM, Meng QR, Shi YR and Qu HJ. 2005. SHRIMP U-Pb dating of zircons from granitoid bodies in the Songpan-Ganzi terrane and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 867–880 (in Chinese with English abstract)
- 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 (in Chinese with English abstract)
- Li JK, Li WC, Wang DH, Lu YX, Yin GH and Xue SR. 2007. Re-Os dating for ore-forming event in the late of Yanshan Epoch and research of ore-forming regularity in Zhongdian Arc. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2415–2422 (in Chinese with English abstract)
- Li JW, Zhao XF, Zhou MF, Ma CQ, De Souza ZS and Vasconcelos P. 2009. Late Mesozoic magmatism from the Daye region, eastern China: U-Pb ages, petrogenesis, and geodynamic implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157(3): 383–409
- Li Q. 2009. Porphyry characteristics and metallogenic significance of Pulang porphyry copper deposit. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geosciences (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 Geosciences (in Chinese with English summary)
- Li WC, Yin GH, Lu YX *et al.* 2009. The evolution and ⁴⁰Ar-³⁹Ar isotopic evidence of the Pulang complex in Zhongdian. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1421–1429 (in Chinese with English abstract)
- Li WC, Yin GH, Yu HJ, Lu YX and Liu XL. 2011. The porphyry metallogenesis of Geza volcanic magmatic arc in NW Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2541–2552 (in Chinese with English abstract)
- Li WC, Yu HJ, Yin GH, Cao XM, Huang DZ and Dong T. 2012. Re-Os dating of molybdenite from Tongchanggou Mo-polymetallic deposit in Northwest Yunnan and its metallogenic environment. *Mineral Deposits*, 31(2): 282–292 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Liu Y, Tu XL, Hu GQ and Zeng W. 2002. Precise determination of chemical compositions in silicate rocks using ICP-AES and ICP-MS: A comparative study of sample digestion techniques of alkali fusion and acid dissolution. *Geochimica*, 31(3): 289–294 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Qi CS, Liu Y, Liang XR, Tu XL, Xie LW and Yang YH. 2005. Petrogenesis of the Neoproterozoic bimodal volcanic rocks along the western margin of the Yangtze Block: New constraints from Hf isotopes and Fe/Mn ratios. *Chinese Science Bulletin*, 50(19): 2155–2160 (in Chinese)
- 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 implications. *Geological Bulletin of China*, 25(1–2): 133–137 (in Chinese with English abstract)
- Liu Y, Deng J, Li CF, Shi GH and Zheng AL. 2007. REE composition in scheelite and scheelite Sm-Nd dating for the Xuebaoding W-Sn-Be deposit in Sichuan. *Chinese Science Bulletin*, 52(18): 2543–2550
- 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. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43
- Liu YS, Gao S, Hu ZC *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 from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571
- Lü BX, Wang Z, Zhang ND, Duan JZ, Gao ZY, Shen GF, Pan CY and Yao P. 1993. Granitoids in the Sanjiang Region and Their Metallogenic Specialization. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Ludwig KR. 2003. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. California: Berkeley Geochronology Center
- Macpherson CG, Dreher ST and Thirlwall MF. 2006. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(3–4): 581–593
- Martin H, Smithies RH, Rapp R, Moyen JF and Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid; Relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79(1–2): 1–24
- McDonough WF and Sun SS. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3–4): 223–253
- Metcalfe I. 2011. Tectonic framework and Phanerozoic evolution of Sundaland. *Gondwana Research*, 19(1): 3–21
- Metcalfe I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 1–33
- Mo XX, Lu FX, Shen SY *et al.* 1993. Volcanic Rocks and Metallogeny of the Sanjiang Region, Southwestern China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Mungall JE. 2002. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits. *Geology*, 30(10): 915–918
- Oyarzun R, Márquez A, Lillo J, López I and Rivera S. 2001. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: Adakitic versus normal calc-alkaline magmatism. *Mineralium Deposita*, 36(8): 794–798
- 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)
- Qu XM, Hou ZQ and Tang SH. 2003. Age of intraplate volcanism in the back-arc area of Yidun island arc and its significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(2): 131–137 (in Chinese with English abstract)
- Rapp RP and Watson EB. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891–931
- Ren JB. 2011. The chronology, geochemistry and mineralizing 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 and Chen JL. 2011a. Zircon geochronology and geological implications of ore-bearing porphyries from Zhongdian arc. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2591–2599 (in Chinese with English abstract)
- Ren JB, Xu JF, Chen JL *et al.* 2011b. Geochemistry and petrogenesis of Pulang porphyries in Sanjiang region. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(4): 581–592 (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
- Thiéblemont D, Stein G and Lescuyer JL. 1997. Gisements épithermaux et porphyriques: La connexion adakite. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 325(2): 103–109
- Wang Q, Wyman DA, Xu JF, Zhao ZH, Jian P, Xiong XL, Bao ZW, Li CF and Bai ZH. 2006a. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos*, 89(3–4): 424–446
- Wang Q, Xu JF, Jian P, Bao ZW, Zhao ZH, Li CF, Xiong XL and Ma JL. 2006b. 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–

- Wang QW, Wang KM, Kan ZZ *et al.* 2008. The Granite in West Sichuan and Its Metallogenic Series. Beijing: Geological Publishing House, 1-305 (in Chinese)
- 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 XS, Bi XW, Leng CB, Tang YY, Lan JB, Qi YQ and Shen NP. 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): 316-321 (in Chinese with English abstract)
- Wang XS, Bi XW, Leng CB *et al.* 2014a. Geochronology and geochemistry of Late Cretaceous igneous intrusions and Mo-Cu-(W) mineralization in the southern Yidun Arc, SW China: Implications for metallogenesis and geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*, 61: 73-95
- Wang XS, Hu RZ, Bi XW, Leng CB, Pan LC, Zhu JJ and Chen YW. 2014b. Petrogenesis of Late Cretaceous I-type granites in the southern Yidun Terrane: New constraints on the Late Mesozoic tectonic evolution of the eastern Tibetan Plateau. *Lithos*, 208-209: 202-219
- Wei C. 2017. Ore-forming fluids characteristics and the separation mechanism of molybdenum and copper of Relin molybdenum-copper deposit, western Yunnan, China. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English summary)
- Williams IS, Buick IS and Cartwright I. 1996. An extended episode of Early Mesoproterozoic metamorphic fluid flow in the Reynolds Range, central Australia. *Journal of Metamorphic Geology*, 14(1): 29-47
- Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325-343
- Wu T, Xiao L, Ma CQ, Pirajno F, Sun Y and Zhan QY. 2014. A mafic intrusion of "arc affinity" in a post-orogenic extensional setting: A case study from Ganluoguo gabbro in the northern Yidun arc belt, eastern Tibetan Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 94: 139-156
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589-1604 (in Chinese)
- Xiang K, Xue CD, Li SL, Qureshi JA and Nguyen BD. 2014. The Laba Yanshanian porphyry Mo(-Cu) deposit in Shangri-La, NW Yunnan, China: Alteration, Mineralization and its genesis. *Acta Geologica Sinica*, 88(S2): 626-628
- Xu JF, Shinjo R, Defant MJ, Wang Q and Rapp RP. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of East China: Partial melting of delaminated lower continental crust. *Geology*, 30(12): 1111-1114
- Xu JF, Wu JB, Wang Q, Chen JL and Cao K. 2014. Research advances of adakites and adakitic rocks in China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(1): 6-13 (in Chinese with English abstract)
- Xu XW, Cai XP, Qu WJ, Song BC, Qin KZ and Zhang BL. 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)
- Xu YG, Yang QJ, Lan JB, Luo ZY, Huang XL, Shi YR and Xie LW. 2012. Temporal-spatial distribution and tectonic implications of the batholiths in the Gaoligong-Tengliang-Yingjiang area, western Yunnan: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 151-175
- Yang FC, Li WC, Liu XL, Yan TL, Wang SS and Luo Y. 2017. Rock genesis and dynamic background of the Relin monzogranite in the Geza arc belt, Yunnan: Constrains from petrogeochemistry, chronology, and Hf isotope. *Geology and Exploration*, 53(2): 283-299 (in Chinese with English abstract)
- Yang LQ, Deng J, Dilek Y, Meng JY, Gao X, Santosh M, Wang D and Yan H. 2016. Melt source and evolution of I-type granitoids in the SE Tibetan Plateau: Late Cretaceous magmatism and mineralization driven by collision-induced transtensional tectonics. *Lithos*, 245: 258-273
- Yang LQ, Deng J, Gao X, He WY, Meng JY, Santosh M, Yu HJ, Yang Z and Wang D. 2017. Timing of formation and origin of the Tongchanggou porphyry-skarn deposit: Implications for Late Cretaceous Mo-Cu metallogenesis in the southern Yidun Terrane, SE Tibetan Plateau. *Ore Geology Reviews*, 81: 1015-1032
- Yang YQ, Hou ZQ, Huang DH *et al.* 2002. Collision orogenic process and magmatic metallogenic system in Zhongdian arc. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(1): 17-24 (in Chinese with English abstract)
- Yin GH, Li WC, Jiang CX, Xu D, Li JK and Yang SR. 2009. The evolution of relin uplex rock masses in Yanshan phase and Ar-Ar dating age and copper-molybdenum mineralization characteristics of Zhongdian volcanic-magma arc. *Geology and Exploration*, 45(4): 385-394 (in Chinese with English abstract)
- Yu HJ, Li WC, Yin GH, Lu YX, Cao XM, Huang DZ, Dong T and Zhang YM. 2014. Zircon U-Pb ages of the granodioritic porphyry in the Laba molybdenum deposit, Yunnan, SW China and its geological implication. *Acta Geologica Sinica*, 88(4): 1183-1194
- Yu HJ, Li WC, Yin GH, Wang JH, Jiang WT, Wu S and Tang Z. 2015. Geochronology, geochemistry and geological significance of the intrusion from the Tongchanggou Mo-Cu deposit, northwestern Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11): 3217-3233 (in Chinese with English abstract)
- Yu HJ and Li WC. 2016. Geochronology and geochemistry of Xiuwacu intrusions, NW Yunnan: Evidences for two-period magmatic activity and mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2265-2280 (in Chinese with English abstract)
- Yu L, Li GJ, Wang QF and Liu XF. 2014. Petrogenesis and tectonic significance of the Late Cretaceous magmatism in the northern part of the Baoshan block: Constraints from bulk geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2709-2724 (in Chinese with English abstract)
- Zeng PS, Mo XX, Yu XH *et al.* 2003. Porphyries and porphyry copper deposits in Zhongdian area, northwestern Yunnan. *Mineral Deposits*, 22(4): 393-400 (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 ND and Zhang HJ. 1993. Ages of several granite plutons in northwestern Sichuan. *Geochimica*, (3): 303-312 (in Chinese with English abstract)
- Zhao YJ, Yuan C, Zhou MF, Yan DP, Long XP and Cai KD. 2007. Post-orogenic extension of Songpan-Garzê orogeny in Early Jurassic: Constraints from Niuxingou monzodiorite and Siguniangshan A-type granite of western Sichuan, China. *Geochimica*, 36(2): 139-152 (in Chinese with English abstract)
- Zhu DC, Zhao ZD, Niu YL, Dilek Y, Hou ZQ and Mo XX. 2013. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau. *Gondwana Research*, 23(4): 1429-1454

附中文参考文献

- 曹康, 许继峰, 陈建林, 黄肖潇, 任江波. 2014. 云南普朗超大型斑岩铜矿床含矿斑岩成因及其成矿意义. *矿床地质*, 33(2): 307-322
- 邓军, 王长明, 李龚健. 2012. 三江特提斯叠加成矿作用样式及过程. *岩石学报*, 28(5): 1349-1361
- 侯增谦, 曲晓明, 周继荣, 杨岳清, 黄典豪, 吕庆田, 唐绍华, 余今杰, 王海平, 赵金花. 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, 李荫清, 张绮玲, 曲晓明. 2003a. 海底热水成矿系统中的流体端员与混合过程: 来自白银厂和呷村 VMS 矿床的流体包裹体证据. 岩石学报, 19(2): 221–234
- 侯增谦, 杨岳清, 王海平, 曲晓明, 吕庆田, 黄典豪, 吴宣志, 余金杰, 唐绍华, 赵金花. 2003b. 三江义敦岛弧碰撞造山过程与成矿系统. 北京: 地质出版社, 1–345
- 侯增谦, 杨岳清, 曲晓明等. 2004. 三江地区义敦岛弧造山带演化 and 成矿系统. 地质学报, 78(1): 109–120
- 胡健民, 孟庆任, 石玉若, 渠洪杰. 2005. 松潘-甘孜地体内花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义. 岩石学报, 21(3): 867–880
- 黄肖潇, 许继峰, 陈建林, 任江波. 2012. 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. 岩石学报, 28(5): 1493–1506
- 李建康, 李文昌, 王登红, 卢映祥, 尹光候, 薛顺荣. 2007. 中甸弧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 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素依据. 地质学报, 83(10): 1421–1429
- 李文昌, 尹光候, 余海军, 卢映祥, 刘学龙. 2011. 滇西北格咱火山-岩浆弧斑岩成矿作用. 岩石学报, 27(9): 2541–2552
- 李文昌, 余海军, 尹光候, 曹晓民, 黄定柱, 董涛. 2012. 滇西北铜厂沟钼多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其成矿环境. 矿床地质, 31(2): 282–292
- 李献华, 刘颖, 涂湘林, 胡光黔, 曾文. 2002. 硅酸盐岩石化学组成的 ICP-AES 和 ICP-MS 准确测定: 酸溶与碱熔分解样品方法的对比. 地球化学, 31(3): 289–294
- 李献华, 祁昌实, 刘颖, 梁细荣, 涂湘林, 谢烈文, 杨岳衡. 2005. 扬子块体西缘新元古代双峰式火山岩成因: Hf 同位素和 Fe/Mn 新制约. 科学通报, 50(19): 2155–2160
- 林清茶, 夏斌, 张玉泉. 2006. 云南中甸地区雪谷坪同碰撞石英闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义. 地质通报, 25(1–2): 133–137
- 吕伯西, 王增, 张能德, 段建中, 高子英, 沈致富, 潘长云, 姚鹏. 1993. 三江地区花岗岩类及其成矿专属性. 北京: 地质出版社
- 莫宣学, 路凤香, 沈上越等. 1993. “三江”特提斯火山作用与成矿. 北京: 地质出版社
- 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
- 曲晓明, 侯增谦, 唐邵华. 2003. 义敦岛弧带弧后区板内岩浆作用的年代及意义. 岩石矿物学杂志, 22(2): 131–137
- 任江波. 2011. 中甸岛弧成矿斑岩和矿床的年代学、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. 2011a. 中甸岛弧成矿斑岩的锆石年代学及其意义. 岩石学报, 27(9): 2591–2599
- 任江波, 许继峰, 陈建林等. 2011b. “三江”地区中甸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
- 王全伟, 王康明, 阚泽忠等. 2008. 川西地区花岗岩及其成矿系列. 北京: 地质出版社, 1–305
- 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
- 王新松, 毕献武, 冷成彪, 唐永永, 兰江波, 齐有强, 沈能平. 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): 316–321
- 魏超. 2017. 滇西热液钼铜矿床成矿流体特征与钼铜分离机制. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589–1604
- 许继峰, 邬建斌, 王强, 陈建林, 曹康. 2014. 埃达克岩与埃达克质岩在中国的研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 33(1): 6–13
- 徐兴旺, 蔡新平, 屈文俊, 宋保昌, 秦克章, 张宝林. 2006. 滇西北红山晚白垩世花岗岩斑岩型 Cu-Mo 成矿系统及其大地构造学意义. 地质学报, 80(9): 1422–1433
- 杨富成, 李文昌, 刘学龙, 彦廷龙, 王帅帅, 罗云. 2017. 格咱岛弧带热液二长花岗岩的岩石成因及动力学背景: 岩石地球化学、年代学及 Hf 同位素约束. 地质与勘探, 53(2): 282–299
- 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
- 尹光候, 李文昌, 蒋成兴, 许东, 李建康, 杨舒然. 2009. 中甸火山-岩浆弧燕山期热液复式岩体演化与 Ar-Ar 定年及铜钼矿化. 地质与勘探, 45(4): 385–394
- 余海军, 李文昌, 尹光候, 王建华, 姜文涛, 吴松, 唐忠. 2015. 滇西北铜厂沟 Mo-Cu 矿床岩体年代学、地球化学及其地质意义. 岩石学报, 31(11): 3217–3233
- 余海军, 李文昌. 2016. 滇西北休瓦促 Mo-W 矿区印支晚期和燕山晚期岩浆活动与成矿作用: 来自锆石 U-Pb 年代学和地球化学的证据. 岩石学报, 32(8): 2265–2280
- 禹丽, 李龚健, 王庆飞, 刘学飞. 2014. 保山地块北部晚白垩世岩浆岩成因及其构造指示: 全岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素制约. 岩石学报, 30(9): 2709–2724
- 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, 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, 22(4): 989–1000
- 张能德, 张怀举. 1993. 四川西北部几个花岗岩体的时代. 地球化学, (3): 303–312
- 赵永久, 袁超, 周美夫, 颜丹平, 龙晓平, 蔡克大. 2007. 松潘-甘孜造山带早侏罗世的后造山伸展: 来自川西牛心沟和四姑娘山岩体的地球化学制约. 地球化学, 36(2): 139–152