

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.126>



中甸弧阿热岩体锆石 U-Pb 年龄、 地球化学特征及岩石成因

周 放^{1,2}, 王保弟^{3*}, 刘 函³, 闫国川^{1,2}, 李小波³

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

3. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610081

摘要: 中甸弧是中国西南“三江”特提斯构造带南段最重要的成矿区之一。前人的研究重点一直放在该带中北部含矿岩体中, 对南部不含矿岩体却了解甚少。对南部阿热岩体进行了岩石学、主量和微量元素地球化学及锆石 U-Pb 年代学等研究, 结果表明阿热岩体(216.3 ± 1.8 Ma)与该地区其他岩体形成时代相同。岩石地球化学研究显示阿热石英二长岩具有高 Sr($1.563 \times 10^{-6} \sim 2.051 \times 10^{-6}$)、低 Y($15.0 \times 10^{-6} \sim 22.4 \times 10^{-6}$)含量及高 Sr/Y 值(86.0~120.5), 富集大离子亲石元素(Rb、Ba、Th、U), 亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti), 并具有轻微负 Eu 异常等特征, 表明岛弧火成岩和埃达克质岩亲和性。同时, 阿热岩体中 MgO 含量(1.97%~3.30%)和 Mg# 值(38.7~50.8, 平均为 43.03)较低, Ni($10.7 \times 10^{-6} \sim 26.8 \times 10^{-6}$)、Cr($18.0 \times 10^{-6} \sim 75.8 \times 10^{-6}$)、Co($12.4 \times 10^{-6} \sim 17.4 \times 10^{-6}$)等相容元素含量也较低, 地球化学性质指示其可能由地壳部分熔融形成。晚三叠世甘孜—理塘俯冲洋壳由于温度和压力的改变发生脱水, 释放的流体或熔体上升至下地壳, 致使下地壳发生部分熔融, 从而产生了阿热地区的这些花岗质岩浆。因此, 晚三叠世阿热岩体形成于陆缘弧构造背景, 是甘孜—理塘洋西向俯冲消减的产物, 而此时很可能发生了大洋向残留海转化的过程。

关键词: 中甸弧; 阿热岩体; 埃达克质岩; 陆缘弧; 甘孜—理塘洋; 地球化学; 地质年代学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2018)08-2614-14

收稿日期: 2018-05-30

Zircon U-Pb Dating, Geochemistry and Petrogenesis of Intrusive Rocks from A're Area, Zhongdian Arc

Zhou Fang^{1,2}, Wang Baodi^{3*}, Liu Han³, Yan Guochuan^{1,2}, Li Xiaobo³

1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China

Abstract: Zhongdian arc, located in Sanjiang Tethyan Orogenic belt in Southwest China southern part of Tethys belt, is one of the most important districts for polymetallic ore deposits. Previous studies mainly focus on the ore-bearing intrusions in the central and northern part of Zhongdian arc, however, there are still limited knowledge about the barren intrusions in the southern part. In this paper, we present detailed petrology, major and trace elemental geochemistry and geochronology of A're granitoids, southern part of Zhongdian arc. Zircon U-Pb dating results show the timing of emplacement of A're intrusion (216.3 ± 1.8 Ma) is comparable to those of the other intrusive rocks in Zhongdian arc. A're quartz monzonites have high Sr (mean $1810.24 \times$

基金项目: 中国地质调查局项目(No.DD20160016); 国家重点研发计划项目(No.2016YFC0600305); 国家自然科学基金项目(Nos. 41773026, 41603038)。

作者简介: 周放(1992—), 男, 硕士, 主要从事矿物学、岩石学、矿床学研究. ORCID: 0000-0002-6667-1873. E-mail: Fzhou6@163.com

* 通讯作者: 王保弟, ORCID: 0000-0002-6266-1483. E-mail: baodiwang@163.com

引用格式: 周放, 王保弟, 刘函, 等, 2018. 中甸弧阿热岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及岩石成因. 地球科学, 43(8): 2614—2627.

10^{-6}), low Y (mean 19.05×10^{-6}) concentrations and thus high Sr/Y($86.0 - 120.5$) ratios. In addition, they also display enrichment in LILE (Rb, Ba, Th, U), depletion in HFSE (Nb, Ta, Ti) and slightly Eu negative anomaly, which suggests that they have geochemical characteristics of both arc-related and adakitic affinities. The low MgO ($1.97\% - 3.30\%$), Ni ($10.7 \times 10^{-6} - 26.8 \times 10^{-6}$), Cr ($18.0 \times 10^{-6} - 75.8 \times 10^{-6}$) and Co ($12.4 \times 10^{-6} - 17.4 \times 10^{-6}$) contents of the A're granitoids support that they were generated from partial melting of thickened lower crust. Therefore, the A're quartz monzonites belong to a part of the continental marginal arc during westward subduction of Ganzi-Litang ocean, which represents the products of transformation from widespread Tethys ocean to residual sea in Zhongdian arc.

Key words: Zhongdian arc; A're intrusive rocks; adakitic rocks; continental arc; Ganzi-Litang ocean; geochemistry; geochronology.

0 引言

中甸弧位于西南三江造山带义敦岛弧的南端,东部和南部是甘孜—理塘结合带,西部是乡城—格咱深大断裂,该断裂向 SSE 方向延伸,与甘孜—理塘深大断裂相接,从而在南部封闭了中甸弧(杨岳清等,2002).随着雪鸡坪斑岩型铜矿、普朗斑岩型铜矿、红山铜多金属矿床、休瓦促钨钼矿、亚杂铜铅锌矿等系列矿床的发现和开发,该地区俨然已成为我国重要的有色金属产地,而对形成该地区众多矿床岩浆过程的研究也已成为国内外关注的热点之一。

前人对研究区中北部各成矿斑岩体的年代学、地球化学和大地构造背景展开了大量卓有成效的研究,认为印支期中甸弧的演化过程主要受控于甘孜—理塘洋的西向俯冲消减,产出的斑岩体在地理位置上可分为西、中和东 3 个带,地球化学特征上均具有埃达克质亲和性(曾普胜等,2006;王守旭等,2008;曹殿华等,2009;庞振山等,2009;任江波等,2011;Wang et al., 2011;董毅等,2012;黄肖潇等,2012;Leng et al., 2012;邹国富等,2012;欧剑杰等,2014;彭惠娟,2014;赖安琦等,2016).但是关于不同斑岩体岩浆源区、斑岩带划分依据、岩浆演化过程、未成矿岩体形成的时代与岩浆源区等问题仍然存在争议,如杨岳清等(2002)认为本区斑岩矿床和矽卡岩矿床的岩浆及成矿物质均源自下地壳和地幔,但近年来对于东部和西部斑岩体岩浆源区的研究却表明成岩岩浆来自于不同源区:东部斑岩体中,部分学者认为普朗斑岩体母岩浆来自被俯冲流体交代的地幔楔部分熔融(黄肖潇等,2012;Chen et al., 2014;Leng et al., 2014),另外有学者指出母岩浆更有可能来自俯冲洋壳的部分熔融(冷成彪等,2007;任江波等,2011);西部斑岩体中,冷成彪等(2007)认为雪鸡坪母岩浆主要来自俯冲洋壳的部分熔融,而沙建泽等(2016)研究认为雪鸡坪母岩浆来自壳幔混源;还有学者通过对整个中甸弧斑岩体研究认为区内斑

岩体母岩浆均来自双地壳结构的年轻下地壳(Cao et al., 2016)或较老的中晚元古代地壳($1.6 - 1.5$ Ga; Peng et al., 2014).又如,前人依据 Ar-Ar 法测年、Rb-Sr 等时线年龄、野外调查和地球化学特征将中甸地区划分为西、东斑岩带和中部蛇绿岩混杂带,并认为西、东斑岩带形成于不同构造背景,西班牙带是早期甘孜—理塘洋向西俯冲形成,东斑岩带是稍晚甘孜—理塘洋壳向东后撤时形成(曾普胜等,2006);但近年来的研究却显示西、东斑岩带形成于相同的构造背景,它们都是甘孜—理塘洋向西俯冲的产物(任江波等,2011; Chen et al., 2014; Peng et al., 2014).综上所述,前人在中甸弧斑岩体岩浆源区、构造背景等问题上还存在较大的分歧.因此,本文对西班牙带阿热岩体中酸性岩石的年代学和地球化学特征进行了研究,探讨岩体形成的时代、岩浆源区特征和形成的构造背景,以期进一步约束中甸弧晚三叠世岩浆活动和构造演化历史.

1 区域地质背景与岩石特征

中甸弧位于义敦岛弧南段(图 1),是三江构造—岩浆—成矿带的重要组成部分,其演化过程受控于甘孜—理塘洋的俯冲消减和弧(陆)—陆碰撞过程,经历了 3 期大的构造运动:首先,甘孜—理塘洋在晚三叠世约 237 Ma 开始向西俯冲,并在约 206 Ma 闭合;之后全区在东西两侧挤压应力作用下发生了强烈碰撞造山作用,这种造山运动一直持续到约 73 Ma;最后,随着青藏高原的隆起,区内出现了大量逆冲—推覆构造和大规模走滑平移活动(侯增谦等,2001,2004;杨岳清等,2002).区内与这 3 期构造运动相对应的 3 期岩浆活动为:印支期俯冲造山运动($237 - 206$ Ma),岩浆活动以岛弧中酸性岩浆为主,产出如雪鸡坪、普朗斑岩型铜矿和红山矽卡岩型铜多金属矿床;燕山晚期($138 - 73$ Ma)造山后伸展作用,岩浆活动以侵入花岗岩为主,以休瓦促、

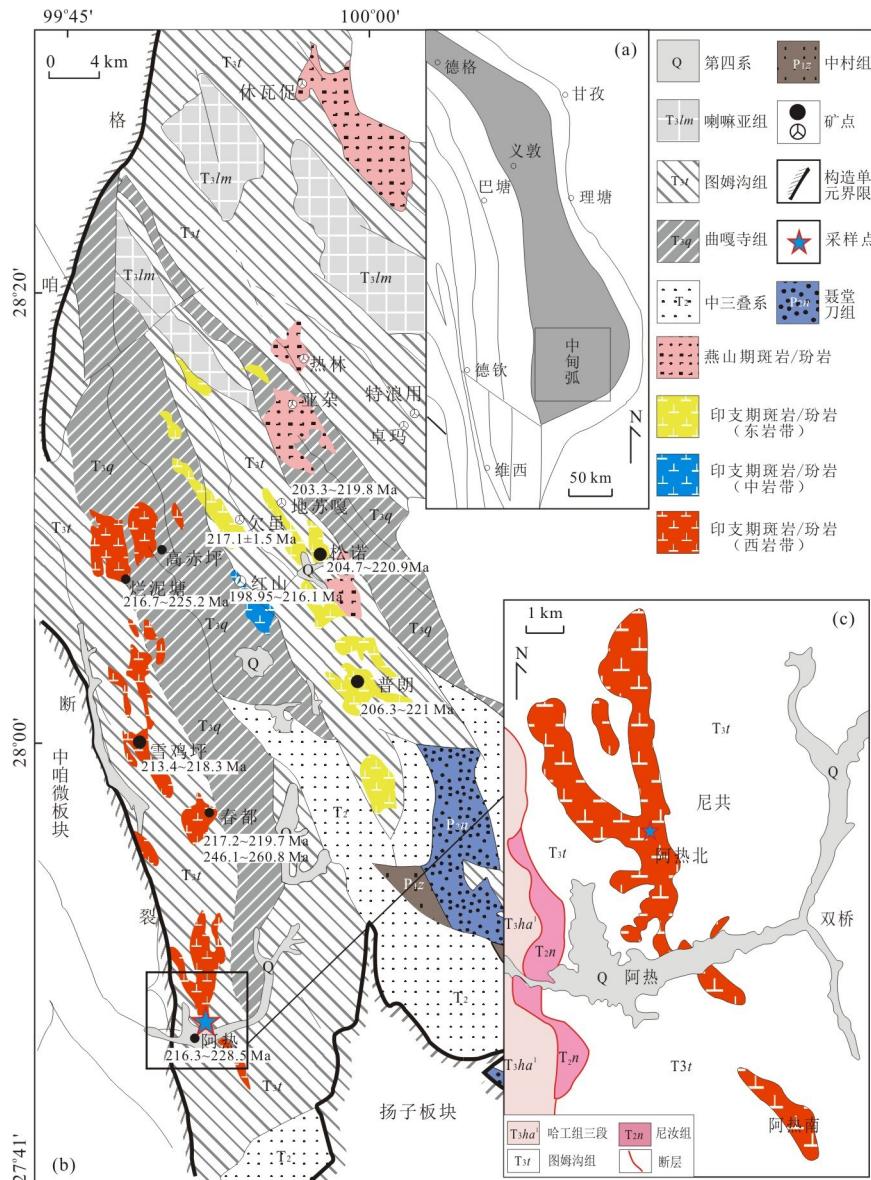


图 1 中甸弧大地构造位置(a)及地质简图(b)和阿热岩体地质简图(c)

Fig.1 Location of Zhongdian arc (a) and simplified geological maps of Zhongdian arc (b) and the study area (c)

图 a 据任江波等(2011);图 b 据董毅(2013)

热林等蚀变花岗岩—热液石英脉型钨—钼矿床为代表(黄肖潇等,2012);喜山期陆内汇聚作用(65~15 Ma),以深源正长岩类活动为主,产出与之有关的斑岩型金矿如诺东、东炉房等斑岩型金铜矿床(侯增谦等,2004)。

本文研究的阿热岩体位于中甸弧西南部,香格里拉以东约 15 km,位于西部斑岩带的最南边,整体展布方向为 NNW 向,呈岩株状产出,露头呈不规则状,岩体出露面积约 15 km². 岩体侵位于上三叠统图姆沟组砂、板岩中,二者接触界面大部分显示平滑形态。岩体主要由石英二长岩、石英闪长玢岩、花岗闪长斑岩、角闪闪长玢岩和辉石闪长玢岩等组成,

呈灰色、灰白色和浅绿色,斑状结构,块状构造,无明显分带,流动构造不发育,局部见石英脉,零星发育黄铁矿化和褐铁矿化(董毅,2013). 样品采集坐标为 27°47'46"N, 99°52'10"E, 笔者共采集 5 组岩石样品作为研究对象。根据镜下特征,样品被定名为石英二长岩,主要由钾长石(40%)、斜长石(27%)、石英(7%)、角闪石(18%)和少量暗色副矿物(磁铁矿、锆石、磷灰石)组成(图 2),大小为 0.5~4.0 mm,其中钾长石呈半自形—自形板柱状,可见卡氏双晶,晶内嵌布少量板条状斜长石,少数钾长石中包含极小粒径的角闪石;斜长石呈半自形—自形柱状,聚片双晶发育,少数晶呈假象结构;角闪石呈他形—半自形短

柱状;石英呈他形粒状,可见波状消光;磁铁矿呈他形粒状,星散分布,多数与角闪石伴生。样品中可见轻微高岭土化、绿泥石化、绢云母化等蚀变。

2 样品处理及分析方法

主量元素分析在国土资源部西南矿产资源监督检测中心用 XRF(Rigaku RIX 2100型)玻璃熔饼法完成,分析精度优于 5%。微量元素分析在中国科学院广州地球化学研究所 Agilent 7500a 型 ICP-MS 分析仪上完成,分析精度优于 5%,具体测试方法和流程可参照 Chen *et al.*(2010)。本次对采自阿热岩体的石英二长岩进行了年代学研究,样品编号为 15ZD-1。锆石阴极发光(CL)图像在北京锆年领航科技公司完成,具体测试方法和流程可参照冷秋锋等

(2016)。U-Pb 测年在国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室完成,激光剥蚀系统为 GeoLasPro 193 nm 激光系统,质谱为高分辨电感耦合等离子体质谱仪 ELEMENT2,实验采用高纯 He 作为剥蚀物质的载气,激光波长为 193 nm,束斑直径为 32 μm,脉冲频率为 6 Hz,激光能量为 6 J/cm²。实验获得数据用软件 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2010)进行处理,最后利用 Isoplot 软件完成加权平均年龄谐和图的绘制(Ludwig, 2003)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

样品 15ZD-1 中的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析结果见表 1。阴极发光图像(图 3)显示大部分锆

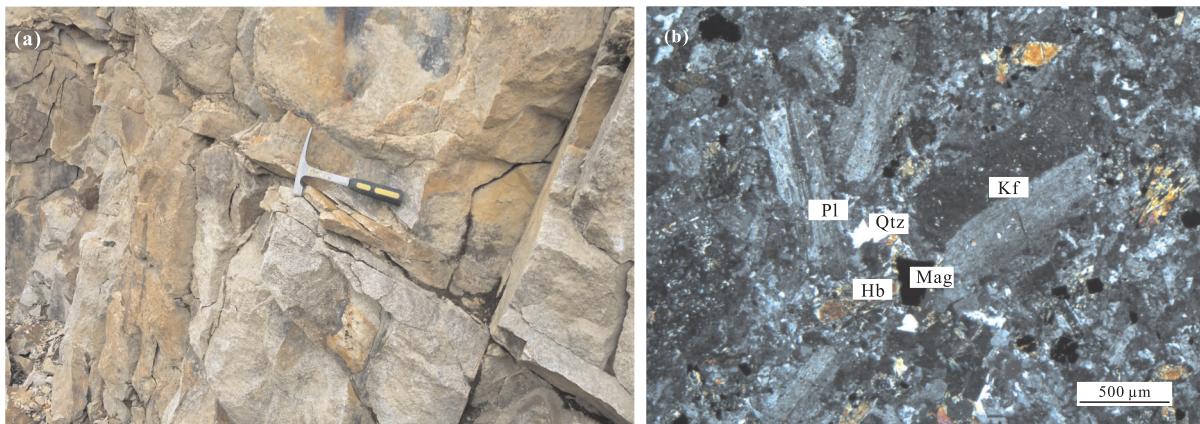


图 2 阿热石英二长岩野外宏观照片和镜下特征(正交偏光)
Fig.2 Macrophotograph and microphoto of quartz monzonite from A're area
Qtz.石英; Pl.斜长石; Kf.钾长石; Hb.角闪石; Mag.磁铁矿

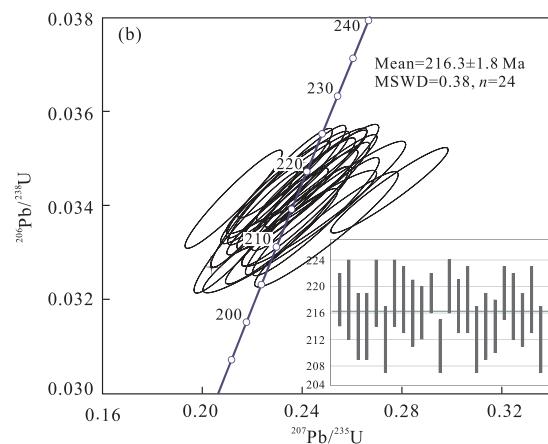
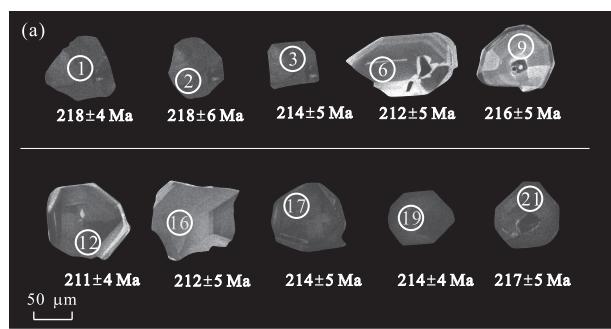


图 3 阿热石英二长岩(15ZD-1)锆石阴极发光图片(a)和 U-Pb 年龄谐和图(b)
Fig.3 The CL images of zircons (a) and U-Pb concordia diagram (b) of quartz monzonite from A're area

表 1 阿热岩体石英二长岩样品(15ZD-1)锆石 U-Pb 定年分析结果
Table 1 Zircon U-Pb dating results of A're quartz monzonite sample (15ZD-1)

测点号	元素含量(10^{-6})				同位素比值				年龄(Ma)						
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ		
15ZD-1-1	2 212	1 038	2.13	0.058 81	0.003 39	0.275 13	0.015 54	0.034 33	0.000 60	560	92	247	12	218	4
15ZD-1-2	2 079	843	2.47	0.051 99	0.004 16	0.242 38	0.018 78	0.034 40	0.000 88	285	130	220	15	218	6
15ZD-1-3	3 848	1 249	3.08	0.047 94	0.002 61	0.221 21	0.011 67	0.033 81	0.000 74	96	78	203	10	214	5
15ZD-1-4	1 050	565	1.86	0.053 95	0.003 86	0.245 61	0.016 80	0.033 77	0.000 83	369	110	223	14	214	5
15ZD-1-5	2 982	1 053	2.83	0.049 66	0.003 88	0.230 97	0.014 02	0.034 48	0.000 77	179	98	211	12	219	5
15ZD-1-6	652	406	1.61	0.055 39	0.004 4	0.249 85	0.019 01	0.033 50	0.000 81	428	127	226	15	212	5
15ZD-1-7	2 007	863	2.33	0.050 01	0.003 75	0.237 86	0.018 65	0.034 53	0.000 74	195	137	217	15	219	5
15ZD-1-8	3 015	1 132	2.66	0.050 16	0.003 06	0.238 97	0.014 87	0.034 34	0.000 73	202	104	218	12	218	5
15ZD-1-9	476	328	1.45	0.055 63	0.005 55	0.248 71	0.021 73	0.034 04	0.000 88	437	149	226	18	216	5
15ZD-1-10	2 178	888	2.45	0.044 92	0.002 63	0.212 64	0.012 87	0.034 14	0.000 69	-23	91	196	11	216	4
15ZD-1-11	4 574	1 501	3.05	0.048 39	0.002 47	0.232 85	0.012 26	0.034 56	0.000 54	119	90	213	10	219	3
15ZD-1-12	1 663	739	2.25	0.050 65	0.003 30	0.231 87	0.014 87	0.033 35	0.000 67	225	110	212	12	211	4
15ZD-1-13	2 955	1 068	2.77	0.051 44	0.003 04	0.243 96	0.014 59	0.034 64	0.000 64	261	103	222	12	220	4
15ZD-1-14	2 422	920	2.63	0.051 47	0.003 32	0.240 53	0.014 51	0.034 19	0.000 66	262	103	219	12	217	4
15ZD-1-15	3 506	1 142	3.07	0.049 52	0.003 31	0.233 95	0.015 66	0.034 44	0.000 84	172	108	213	13	218	5
15ZD-1-16	485	337	1.44	0.051 83	0.004 87	0.235 14	0.022 99	0.033 45	0.000 86	278	174	214	19	212	5
15ZD-1-17	1 604	748	2.14	0.051 84	0.002 91	0.238 08	0.013 69	0.033 68	0.000 76	278	90	217	11	214	5
15ZD-1-18	1 766	776	2.28	0.136 48	0.009 90	0.766 09	0.059 92	0.039 57	0.000 83	2183	107	578	34	250	5
15ZD-1-19	3 627	1 121	3.24	0.051 36	0.003 06	0.237 98	0.014 55	0.033 78	0.000 70	257	103	217	12	214	4
15ZD-1-20	2 024	1 033	1.96	0.052 09	0.003 13	0.247 57	0.014 93	0.034 53	0.000 65	289	103	225	12	219	4
15ZD-1-21	4 380	1 444	3.03	0.051 37	0.002 99	0.243 54	0.015 64	0.034 20	0.000 76	257	106	221	13	217	5
15ZD-1-22	3 667	1 274	2.88	0.049 43	0.002 85	0.230 24	0.013 43	0.033 88	0.000 61	168	100	210	11	215	4
15ZD-1-23	1 991	8 65	2.30	0.049 56	0.003 67	0.233 25	0.017 03	0.034 39	0.000 79	174	123	213	14	218	5
15ZD-1-24	3 009	1 304	2.31	0.048 02	0.003 24	0.219 03	0.014 71	0.033 46	0.000 87	100	101	201	12	212	5

石颗粒呈圆柱状,长宽比为 $1:1\sim1:1.5$,可见明显的震荡环带结构。本次测试24颗锆石共24个测点,其中23个测点的年龄非常集中(除18号测点外),均落在谐和线附近,Th含量为 $476\times10^{-6}\sim4574\times10^{-6}$,U含量为 $328\times10^{-6}\sim1501\times10^{-6}$,Th/U值介于1.44~3.24,属于典型岩浆锆石。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 $216.3\pm1.8\text{ Ma}$ (MSWD=0.38),代表了所测岩石的形成时代。

3.2 主量元素特征

主量元素分析结果见表2。样品在TAS图解中落入二长岩—石英二长岩—正长岩的交汇部位(图4),但根据镜下特征仍被定名为石英二长岩, SiO_2 含量为59.60~62.96%,里特曼指数 σ 变化范围为3.2~5.2,属于钙碱性—碱性岩。样品的A/CNK值>1(图5a),属过铝质岩石,MgO含量为1.97%~3.3%,Mg[#]值为38.7~50.8。样品相对富K,K₂O含量为4.34%~5.40%,Na₂O含量为3.13%~3.96%,K₂O/Na₂O值为1.26~1.56,在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解中均落在钾玄岩系列区域(图5b)。

3.3 微量特征

微量元素分析结果见表2。微量元素蛛网图(图

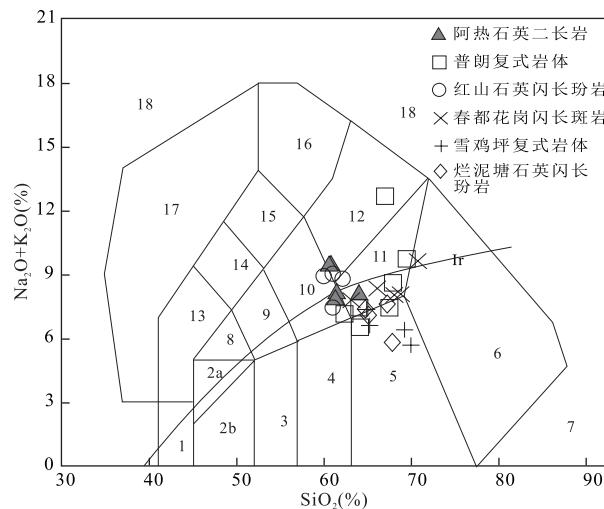


图4 中甸地区印支期侵入岩 TAS 图解

Fig. 4 TAS diagram of Indosinian intrusive rocks from Zhongdian arc

底图据Eric(1994)。普朗复式岩体数据据任江波等(2011);红山石英闪长玢岩数据据黄肖潇等(2012);春都花岗闪长斑岩数据据吴静等(2011);雪鸡坪复式岩体数据据冷成彪等(2007);烂泥塘石英闪长玢岩数据据姜文涛等(2014)。1.橄榄辉长岩;2a.碱性辉长岩;2b.亚碱性辉长岩;3.辉长闪长岩;4.闪长岩;5.花岗闪长岩;6.花岗岩;7.硅英岩;8.二长辉长岩;9.二长闪长岩;10.二长岩;11.石英二长岩;12.正长岩;13.副长石辉长岩;14.副长石二长闪长岩;15.副长石二长正长岩;16.副长正长岩;17.副长深成岩;18.霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩

表2 阿热石英二长岩主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果

Table 2 Major elements(%) and trace elements(10^{-6}) results of A're quartz monzonite

样品号	15ZD-1	15ZD-2	15ZD-3	15ZD-4	15ZD-5
SiO_2	59.60	59.85	62.96	60.14	59.80
TiO_2	0.81	0.81	0.78	0.96	0.80
Al_2O_3	15.38	15.52	14.44	14.12	14.05
Fe_2O_3	6.34	6.18	5.52	6.80	6.32
MnO	0.12	0.13	0.11	0.16	0.10
MgO	2.10	1.97	2.15	2.53	3.30
CaO	4.29	4.21	3.96	4.60	4.92
Na_2O	3.90	3.96	3.53	3.13	3.40
K_2O	5.40	5.39	4.46	4.89	4.34
P_2O_5	0.41	0.41	0.39	0.54	0.51
LOI	1.06	1.00	1.24	1.60	1.96
Total	99.41	99.43	99.54	99.47	99.50
Mg [#]	39.6	38.7	43.6	42.4	50.8
Sc	15.4	14.2	17.3	13.5	17.0
Ti	5 094	4 852	5 755	4 679	4 666
V	167	156	163	124	141
Cr	21.6	18.0	30.4	30.7	75.8
Mn	943	932	1 205	798	789
Co	13.5	12.4	17.4	13.4	17.2
Ni	12.4	10.7	20.2	16.3	26.8
Cu	22.7	36.2	64.1	39.8	55.6
Zn	66.6	69.3	81.5	50.5	70.0
Ga	20.7	19.7	19.1	18.7	18.1
Ge	2.68	2.54	2.61	2.24	2.28
Rb	112	105	109	100	109
Sr	2 052	1 747	1 878	1 563	1 812
Y	22.4	20.3	20.9	16.7	15.0
Zr	261	237	255	222	194
Nb	24.4	23.4	22.1	21.4	17.1
Cs	3.80	3.21	5.86	2.20	3.35
Ba	4 094	3 701	2 947	2 849	2 888
La	67.7	63.4	54.4	55.1	50.8
Ce	125	112	95.7	93.6	90.3
Pr	13.2	12.4	10.8	10.3	10.3
Nd	47.7	43.9	39.6	35.7	36.8
Sm	8.12	7.51	7.04	6.03	6.34
Eu	2.16	2.00	1.87	1.61	1.69
Gd	6.68	6.29	5.98	4.92	5.13
Tb	0.82	0.75	0.77	0.62	0.61
Dy	4.09	3.84	3.92	3.11	3.01
Ho	0.76	0.70	0.72	0.58	0.55
Er	2.01	1.83	1.93	1.54	1.39
Tm	0.29	0.26	0.28	0.22	0.20
Yb	1.80	1.67	1.72	1.42	1.26
Lu	0.28	0.26	0.27	0.22	0.19
Hf	6.68	6.25	6.81	6.04	5.49
Ta	1.33	1.31	1.31	1.35	1.05
Pb	45.5	49.3	60.0	49.0	66.6
Th	19.7	19.4	19.3	20.2	16.5
U	4.34	4.06	3.82	4.06	3.99

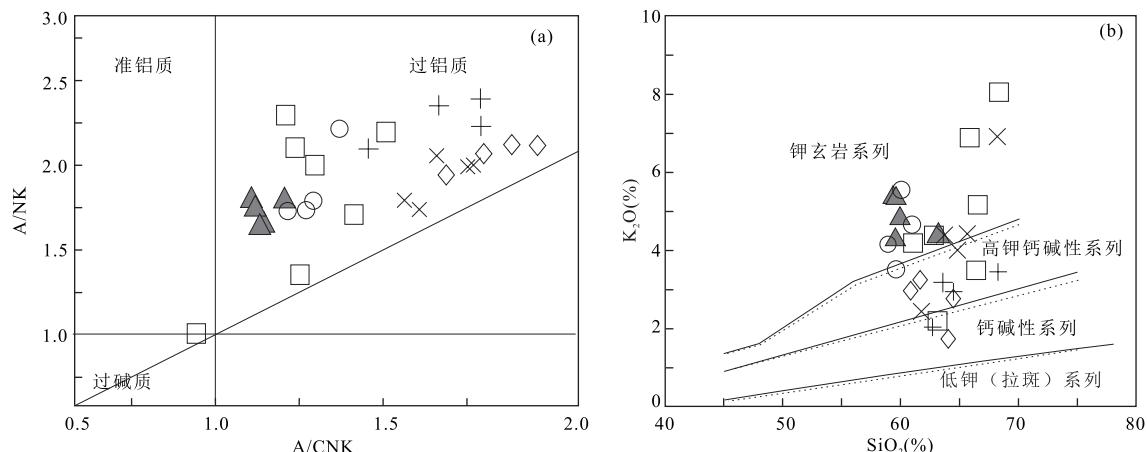
图 5 阿热石英二长岩 K_2O - SiO_2 图解(a)和 A/NK - A/CNK 图解(b)Fig.5 Plots of K_2O - SiO_2 (a) and A/NK - A/CNK (b) of quartz monzonite from A're area

图 a 据 Peccerillo and Taylor (1976); 图 b 据 Rickwood (1989). 数据来源和图例同图 4

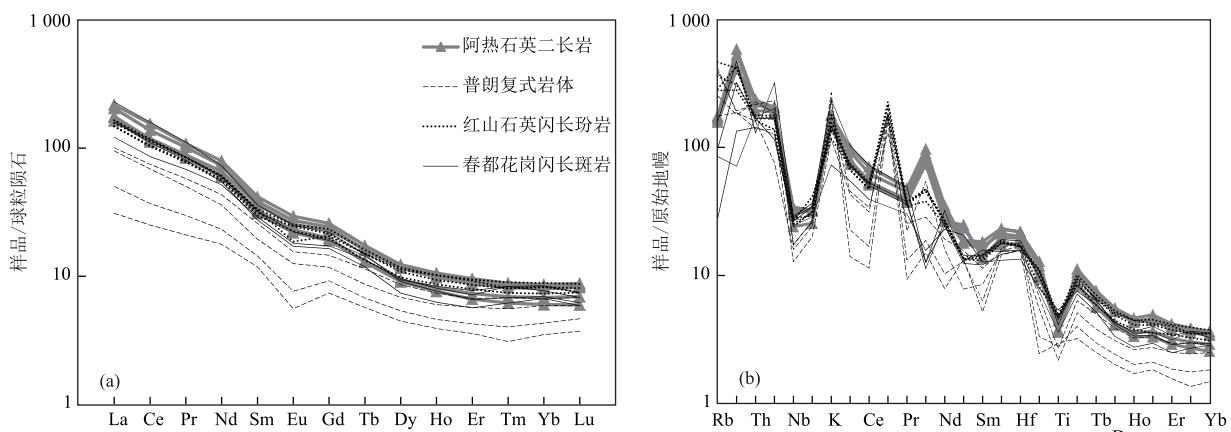


图 6 中甸地区印支期中酸性岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig.6 Chondrite-normalized REE pattern (a) and primitive mantle-normalized trace elements spider diagram (b) of Indosinian intermediate-acid rocks from Zhongdian arc

标准化数据引自 Sun and McDonough (1989)

6b)显示,样品相对富集 Rb、Ba、Sr、K 等大离子亲石元素(LILE),亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素(HFSE)。相比中甸地区其他印支期斑岩体,阿热岩体具有较高的 Sr 元素含量($1\ 563 \times 10^{-6} \sim 2\ 052 \times 10^{-6}$)和 Ba 元素含量($2\ 888 \times 10^{-6} \sim 4\ 094 \times 10^{-6}$);同时还具有 Y 含量($15.0 \times 10^{-6} \sim 22.4 \times 10^{-6}$)低、Sr/Y 值(86.0 ~ 120.5)高,Ni($10.7 \times 10^{-6} \sim 26.8 \times 10^{-6}$)、Cr($18.0 \times 10^{-6} \sim 75.8 \times 10^{-6}$)、Co($12.4 \times 10^{-6} \sim 17.4 \times 10^{-6}$)等高度相容元素含量较低等特点。样品的稀土元素配分模式(图 6a)也与其他印支期斑岩类似,均呈明显的右倾式,为轻稀土富集型,轻稀土(LREE)和重稀土(HREE)分异明显($21 < (La/Yb)_N < 27$)。同时,相对于重稀土而言

($2.7 < (Gd/Lu)_N < 3.3$),轻稀土分异更明显($4.9 < (La/Sm)_N < 5.7$),并且显示轻微的 Eu 负异常($\delta Eu = 0.86 \sim 0.88$)。

4 讨论

4.1 阿热岩体岩浆活动的时代

曾普胜等(2006)结合中甸弧各斑岩体的空间分布、年代学和地球化学等特征,将印支期斑岩体划分为西(242.92 ~ 237.5 Ma)、中(218 ~ 214 Ma)、东(218 ~ 203 Ma)3 个带,并认为西班牙带是早三叠世甘孜—理塘洋向西俯冲引发岩浆活动而形成,中部都蛇绿混杂岩带是向西俯冲根植的洋壳(残片),

东斑岩带是稍晚甘孜—理塘洋壳向东后撤时形成。

建立上述分带模型的重要前提是同位素测年结果(西班牙带比东斑岩带早 30 Ma)。但是前人采用的测年方法如 Rb-Sr 法、Ar-Ar 法等容易受后期热事件和矿物蚀变的影响,而导致封闭体系测年结果置信度不高(唐功建等,2009;黄肖潇等,2012)。因此,本文对西班牙带南部的阿热岩体进行了高精度锆石 U-Pb 测年,所得年龄 216.3 ± 1.8 Ma 代表了阿热岩体的形成时代。

本文收集了近年来中甸地区高精度 LA-ICP-MS SHRIMP 锆石定年结果(表 3)(林清茶等,2006;王守旭等,2008;曹殿华等,2009;庞振山等,

2009;张兴春等,2009;任江波等,2011;Wang et al.,2011;杨帆等,2011;董毅等,2012;黄肖潇等,2012;Leng et al.,2012;杨宪涛等,2012;邹国富等,2012;刘学龙等,2014;欧剑杰,2014;彭惠娟,2014;赖安琦等,2016)。西班牙带中雪鸡坪岩体锆石定年结果为 $213.4 \sim 215.2$ Ma,烂泥塘斑岩体锆石定年结果为 $216.7 \sim 225.2$ Ma,阿热斑岩体锆石 U-Pb 定年结果为 $216.3 \sim 228.5$ Ma,春都斑岩体的锆石定年结果分为 $252.1 \sim 260.8$ Ma 和 $212 \sim 219.7$ Ma 两组。中斑岩带红山斑岩体定年结果为 $198.85 \sim 216.1$ Ma。东斑岩带普朗复式岩体 U-Pb 定年结果为 $206.3 \sim 226.3$ Ma,松诺斑岩体 U-Pb 定年结果为 $204.7 \sim$

表 3 中甸地区印支期中酸性岩年龄统计

Table 3 Age statistics of intermediate-acid intrusive rocks from Zhongdian arc

位置	岩体	岩性	方法	年龄(Ma)	数据来源
西部岩体	烂泥塘	石英二长斑岩	LA-ICPMS	216.7	任江波等(2011)
	烂泥塘	闪长玢岩	LA-ICPMS	225.2 ± 3.5	欧剑杰(2014)
	烂泥塘	石英闪长玢岩	LA-ICPMS	219.2 ± 1.8	Leng et al. (2012)
	雪鸡坪	石英闪长玢岩	SHRIMP	215.3 ± 2.3	林清茶等(2006)
	雪鸡坪	石英二长斑岩	SHRIMP	215.2 ± 1.9	曹殿华等(2009)
	雪鸡坪	石英二长斑岩	LA-ICPMS	213.4 ± 1.5	任江波等(2011)
	雪鸡坪	石英二长斑岩	SIMS	218.3 ± 1.6	Leng et al. (2012)
	春都	石英二长斑岩	SIMS	219.7 ± 1.8	张兴春等(2009)
	春都	闪长玢岩	LA-ICPMS	252.1 ± 2.3	杨宪涛等(2012)
	春都	花岗闪长斑岩	LA-ICPMS	217.2 ± 2	杨帆等(2011)
	春都	闪长玢岩	LA-ICPMS	212 ± 3	杨帆等(2011)
	春都	闪长玢岩	LA-ICPMS	246.1 ± 3	邹国富等(2012)
	春都	闪长玢岩	LA-ICPMS	260.8 ± 2.5	邹国富等(2012)
	春都	闪长玢岩	LA-ICPMS	252.3 ± 3.4	邹国富等(2012)
	春都	花岗闪长斑岩	LA-ICPMS	217.5 ± 1.9	邹国富等(2012)
	春都	花岗闪长斑岩	LA-ICPMS	217.3 ± 1.8	邹国富等(2012)
中部蛇绿岩 混杂带	阿热	角闪闪长玢岩	LA-ICPMS	228.5 ± 1.1	董毅等(2012)
	阿热	花岗闪长斑岩	LA-ICPMS	219.8 ± 0.63	董毅等(2012)
	阿热	石英二长岩	LA-ICPMS	216.3 ± 1.8	本文
	红山	石英闪长玢岩	LA-ICPMS	216.1 ± 3.2	黄肖潇等(2012)
	红山	闪长玢岩	LA-ICPMS	201.17 ± 0.74	彭惠娟(2014)
	红山	闪长玢岩	LA-ICPMS	198.95 ± 0.58	彭惠娟(2014)
	普朗	石英闪长玢岩	单颗粒锆石	221 ± 1.0	庞振山等(2009)
	普朗	石英二长斑岩	LA-ICPMS	215.3	任江波等(2011)
	普朗	石英二长斑岩	单颗粒锆石	211.8 ± 0.5	庞振山等(2009)
	普朗	石英二长斑岩	SHRIMP	226.3 ± 2	王守旭等(2008)
东部岩体	普朗	花岗闪长斑岩	单颗粒锆石	206.3 ± 0.7	庞振山等(2009)
	松诺	石英二长斑岩	SHRIMP	220.9 ± 3.5	冷成彪等(2008)
	松诺	石英二长斑岩	LA-ICPMS	204.7 ± 1.4	赖安琦等(2016)
	地苏嘎	石英闪长玢岩	LA-ICPMS	219.8 ± 3.0	Wang et al. (2011)
	地苏嘎	不含矿石英闪长玢岩	LA-ICPMS	203.3 ± 0.54	刘学龙等(2014)
	地苏嘎	含矿石英闪长玢岩	LA-ICPMS	217.25 ± 0.89	刘学龙等(2014)
	地苏嘎	含矿石英闪长玢岩	LA-ICPMS	208.5 ± 1.0	刘学龙等(2014)
	欠虽	石英闪长玢岩	LA-ICPMS	217.1 ± 1.5	任江波等(2011)

220.9 Ma, 地苏嘎 U-Pb 定年结果为 203.3~219.8 Ma, 欠虽岩体定年结果为 217.1±1.5 Ma. 以上表明除西班牙带中极少量样品年龄较大外(约 250 Ma, 由俯冲前期岩浆活动产生), 东部、西部斑岩体和中部红山斑岩体形成的时代并没有明显差距, 岩浆活动高峰期都在 215 Ma 左右(图 7), 且微量元素具有类似的地球化学特征(下文讨论). 上述讨论表明划分东、西班牙带的证据并不充足, 本文认为中甸弧印支期斑岩体很可能是在同一时期同一构造背景下形成.

4.2 岩浆源区特征

前人的研究表明阿热岩体存在石英二长岩、石英闪长玢岩和花岗闪长斑岩等 5 种不同特征的岩石, 并且各特征岩石间不具有明显的分带性(陈阳, 2016). 另外, 区域地质背景和年代学特征还显示不同特征岩石均为挤压环境下同造山期形成, 且岩石成因属于同源岩浆作用(董毅, 2013). 因此, 本文石英二长岩的岩浆源区特征可以代表阿热岩体其他几种类型岩石的岩浆源区特征.

本文石英二长岩的 SiO_2 含量>59%, 属于广义上的花岗质岩石. 轻、重稀土元素分异明显($(\text{La/Yb})_N$ 值为 21~27), 亏损重稀土(HREE), 意味着源区中有石榴子石或角闪石残留相的存在(赵振华, 1985); 而轻微的负 Eu 异常暗示岩浆演化过程中没有或者很少发生斜长石的分离结晶作用, 或者岩浆形成时源区斜长石很少发生部分熔融. 微量元素原始地幔标准化蛛网图显示其富集大离子亲石元素(Rb、Ba、Sr、Th 等), 亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti), 具有岛弧岩浆的地球化学特征. Ba 元素含量很高($2849 \times 10^{-6} \sim 4094 \times 10^{-6}$), 同时具有较高的 Ba/La 值(51~60), 反映石英二长岩为流体交代参与的

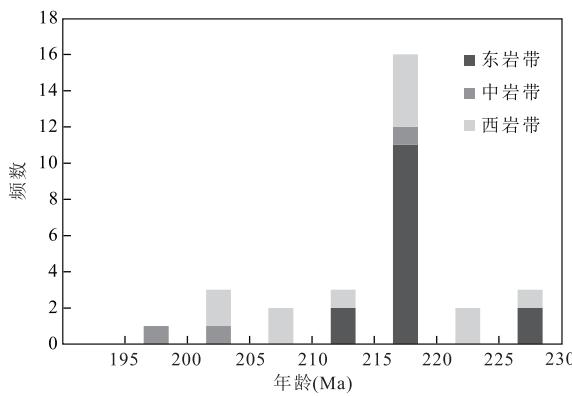


图 7 中甸弧印支期中酸性岩年龄分布

Fig. 7 Age distribution of Indosinian intermediate-acid intrusive rocks from Zhongdian arc

岛弧产物(Zhao et al., 2009). 同时岩石异常高的 Sr 含量($1563 \times 10^{-6} \sim 2052 \times 10^{-6}$)不是源区斜长石部分熔融产生的而是富集大离子亲石元素(LILE)的流体带来的(Eu 轻微负异常和 Ba 元素含量很高); 同时 Y 含量较低($15.0 \times 10^{-6} \sim 22.4 \times 10^{-6}$), Sr/Y 值较高(86.0~120.5).

从前述可知, 阿热岩体具有“高 Sr 低 Y”、“亏损高场强元素(HFSE)”、“富集大离子亲石元素(LILE)”、“ SiO_2 含量>59%”等特征, 且 $(\text{La/Yb})_N$ 与 Yb_N 处在经典岛弧岩石与埃达克质岩的过渡区域(图 8). 所以, 阿热岩体在地球化学特征上具有一定程度的埃达克质亲和性, 这与前人对该地区其他斑岩体的研究结论一致(冷成彪等, 2007; 陈玲等, 2013; 李世超等, 2017).

但是对这种埃达克质亲和性形成的原因, 学者们却有 2 种截然不同的解释: 一种观点是俯冲板片脱挥发分从而交代上覆的地幔楔, 被流体交代的地幔楔进而发生部分熔融, 熔融形成的钙碱性-碱性岩浆在上升成岩的过程中发生同化混染和分离结晶作用(AFC 过程)形成了具有埃达克质亲和性的花岗质岩浆(黄肖潇等, 2012; Chen et al., 2014); 另一种观点为埃达克质亲和性形成的原因可能是俯冲的甘孜-理塘洋壳部分熔融, 并受到下地壳物质混染(冷成彪等, 2007; 任江波等, 2011).

这 2 种观点的区别在于母岩浆演化过程是以分离结晶为主还是以部分熔融为主. 阿热岩体及整个地区其他岩体的 La-La/Sm 和 La-La/Yb 地球化学图解显示(图 9), 区内岩浆成岩过程主要是以部

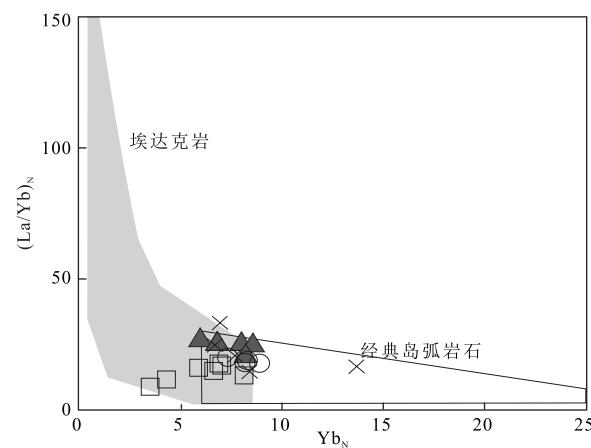


图 8 中甸弧印支期侵入岩 $(\text{La/Yb})_N$ - Yb_N 图解

Fig. 8 $(\text{La/Yb})_N$ - Yb_N diagram for Indosinian intermediate-acid intrusive rocks from Zhongdian arc
底图据 Defant and Drummond (1990). 数据来源和图例同图 4

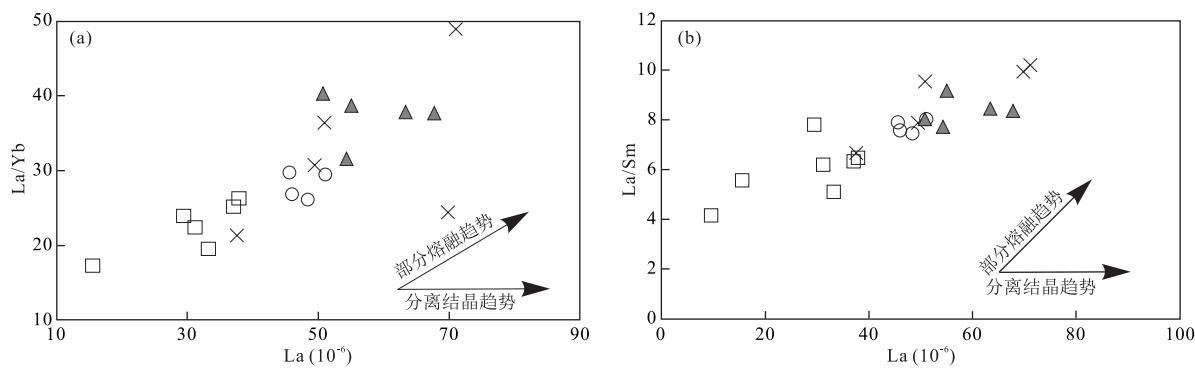


图 9 中甸地区印支期中酸性岩 La/Yb-La 图解(a)与 La/Sm-La 图解(b)

Fig.9 Plots of La/Yb-La (a) and La/Sm-La (b) for Indosinian intermediate-acid intrusive rocks from Zhongdian arc
底图据 Wang et al. (2011). 数据来源和图例同图 4

分熔融为主而非分离结晶。同时,阿热石英二长岩还具有如下特征:MgO 含量(1.97%~3.30%)和 Mg[#]值较高(38.7~50.8);Ni (10.7×10^{-6} ~ 26.8×10^{-6})、Cr (18.0×10^{-6} ~ 75.8×10^{-6})、Co (12.4×10^{-6} ~ 17.4×10^{-6})等相容元素含量较低(明显区别于地幔楔部分熔融后经 AFC 过程的熔体);同时, K₂O/Na₂O 值>1(平均为 1.37),这些特征都说明具埃达克质亲和性的岩浆并不是地幔楔部分熔融后经 AFC 过程形成的,而更有可能是地壳直接部分熔融形成(熊乐等,2017)。另一方面,如果是俯冲洋壳直接部分熔融将会形成典型的埃达克质岩浆(Defant and Drummond, 1990),但是本文结果显示阿热岩体并不是典型的埃达克质岩,而只是具有埃达克质亲和性。因此,笔者认为阿热岩体母岩浆来自受流体交代的加厚下地壳的部分熔融产物,结合区域资料总结中甸弧晚三叠世岩浆活动的演化过程如下:晚

三叠世甘孜—理塘俯冲洋壳由于温度和压力的改变或者软流圈地幔沿板片窗上涌带来热量(Cao et al., 2016)发生脱水和部分熔融;释放出富 LILE 流体和熔体,流—熔混合体上升后既可交代地幔楔使其发生部分熔融(经 AFC 过程形成如普朗岩体),又可以直接上升导致下地壳部分熔融(形成如阿热岩体等),最后壳源、壳—幔混源的岩浆在区域上侵入形成了扇形分布的斑岩体。

4.3 构造背景及其构造意义

潘桂棠等(2005)的研究表明甘孜—理塘洋于晚二叠世扩张,俯冲于晚三叠世(中期),闭合于晚三叠世末期,在其西侧形成了义敦岛弧带。另外,还有学者认为甘孜—理塘洋盆于早二叠世至早三叠世打开,其向西俯冲的高峰时间在中三叠世晚期(约 215 Ma),俯冲时限为 206~237 Ma(侯增谦等,2001;任江波等,2011)。

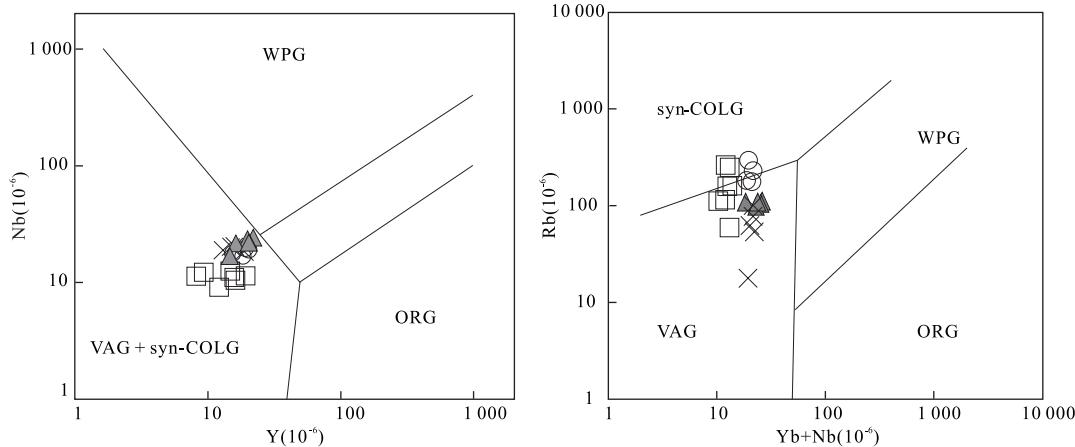


图 10 阿热石英二长岩构造环境判别图解

Fig.10 Tectonic discrimination diagrams of quartz-monzonite from A're area
底图据 Pearce (1984). 数据来源和图例同图 4

本文获得阿热岩体形成时代为 216.3 ± 1.8 Ma, 与中甸弧内中酸性岩浆活动高峰期一致(约 215 Ma), 应该是甘孜—理塘洋向西俯冲时引发岩浆活动的产物。阿热岩体亏损 HFSE、富集 LILE、 K_2O/Na_2O 值 >1 、属于过铝质($A/CNK > 1$)、 $(La/Yb)_N - Yb_N$ 图解中处在经典岛弧岩石与埃达克质岩的过渡区域, 这些特征表明其具有典型的陆缘弧特征(图 10)。而且本区岩石均为钾玄岩系列, 邓晋福等(1996)认为俯冲带内钾玄岩系列的出现是大洋岩石圈俯冲结束、陆内汇聚开始的岩石学标志。因此, 笔者认为阿热岩体形成于陆缘弧构造背景, 此时弧—陆已经开始接触, 大洋转化为残留海。

5 结论

(1) LA-ICP-MS 定年结果显示阿热岩体形成于 216.3 ± 1.8 Ma, 与雪鸡坪、烂泥塘等岩体活动时代一致, 指示中甸弧西部存在强烈的晚三叠世岩浆活动。

(2) 阿热石英二长岩兼具岛弧火成岩和埃达克质岩特征, 很可能是俯冲板片流体交代引发下地壳物质部分熔融的产物。

(3) 阿热岩体形成于陆缘弧构造背景, 是印支期甘孜—理塘洋西向俯冲消减过程的产物, 指示该时期甘孜—理塘洋已向残留海转化, 进一步指示弧(陆)—陆碰撞即将开始。

致谢: 感谢审稿人对本文提出的宝贵修改意见。

References

- Cao, D. H., Wang, A. J., Huang, Y. F., et al., 2009. SHRIMP Geochronology and Hf Isotope Composition of Zircons from Xuejiping Porphyry Copper Deposit, Yunnan Province. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1430—1435 (in Chinese with English abstract).
- Cao, K., Xu, J. F., Chen, J. L., et al., 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. <https://doi.org/10.1016/J.Jseaes.2015.10.024>
- Chen, J. L., Xu, J. F., Ren, J. B., et al., 2014. Geochronology and Geochemical Characteristics of Late Triassic Porphyritic Rocks from the Zhongdian Arc, Eastern Tibet, and Their Tectonic and Metallogenetic Implications. *Gondwana Research*, 26(2): 492—504. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.07.022>
- Chen, J. L., Xu, J. F., Wang, B. D., 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. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.03.003>
- Chen, L., Xu, J. F., Chen, J. L., et al., 2013. The Geochemical Characteristics of Late-Triassic Volcanic Rocks from Wengshui in Zhongdian Area, Yunnan and Tectonic Significant. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1156—1166 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y., 2016. Geological and Geochemical Characteristics and Metallogenetic Characteristics of the A'Re Mass in Shangri-La County, Yunnan Province (Dissertation). Chengdu University of Technology, Sichuan (in Chinese with English abstract).
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347: 662—665. <https://doi.org/10.1038/347662a0>
- Deng, J. F., Zhao, H. L., Mo, X. X., et al., 1996. Root-Column Structure of Continental in China: The Key to Continental Dynamics. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Dong, Y., 2013. Geochronology and Geochemistry of A'Re Porphyry in Shangri-La, Northwest Yunnan: Petrogenesis and Implications (Dissertation). Chengdu University of Technology, Sichuan (in Chinese with English abstract).
- Dong, Y., Liu, X. F., Deng, J. H., et al., 2012. Genesis and Metallogenetic Significance of the Indosinian Intermediate-Acidic Intrusive Rocks in the West Porphyry Belt, Zhongdian Island Arc, Yunnan. *Geology in China*, 39(4): 887—899 (in Chinese with English abstract).
- Eric, A. K. M., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37(3—4): 215—224.
- Hou, Z. Q., Qu, X. M., Zhou, J. R., et al., 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, Z. Q., Yang, Y. Q., Qu, X. M., 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, X. X., Xu, J. F., Chen, J. L., et al., 2012. Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of Two Periods of Intermediate-Acid Intrusive Rocks from Hongshan Ar-

- ea in Zhongdian Arc. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1493–1506 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, W.T., Li, W.C., Liu, X.L., 2014. Geochemical Characteristics of Lannitang Porphyry Deposit in Porphyry Belt of Geza Island Arc, Southwest China. *Mineral Deposits*, 33(S1): 205–206 (in Chinese).
- Lai, A.Q., Li, W.C., Liu, X.L., et al., 2016. Zircon U-Pb Dating, Geochemical Characteristics of Songnuo Quartz Monzonite Porphyries in the Geza Arc, Yunnan Province, and Their Geological Significance. *Geological Review*, 62(4): 955–969 (in Chinese with English abstract).
- Leng, C.B., Huang, Q.Y., Zhang, X.C., et al., 2014. Petrogenesis of the Late Triassic Volcanic Rocks in the Southern Yidun Arc, SW China: Constraints from the Geochronology, Geochemistry, and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopes. *Lithos*, 190–191: 363–382. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.12.018>
- Leng, C.B., Zhang, X.C., Hu, R.Z., et al., 2012. Zircon U-Pb and Molybdenite Re-Os Geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopic Constraints on the Genesis of the Xuejiping Porphyry Copper Deposit in Zhongdian, Northwest Yunnan, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 60: 31–48. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2012.07.019>
- Leng, C.B., Zhang, X.C., Wang, S.X., et al., 2007. Geochemical Characteristics of Porphyry Copper Deposits in the Zhongdian Area, Yunnan as Exemplified by the Xuejiping and Pulang Porphyry Copper Deposits. *Acta Mineralogica Sinica*, 27(3–4): 414–422 (in Chinese with English abstract).
- Leng, C.B., Zhang, X.C., Wang, S.X., et al., 2008. Shrimp Zircon U-Pb Dating of the Songnuo Ore-Hosted Porphyry, Zhongdian, Northwest Yunnan, China and Its Geological Implication. *Geotectonica et Metallogenesis*, 32(1): 124–130 (in Chinese with English abstract).
- Leng, Q.F., Tang, J.X., Zheng, W.B., et al., 2016. Geochronology, Geochemistry and Zircon Hf Isotopic Compositions of the Ore-Bearing Porphyry in the Lakang'e Porphyry Cu-Mo Deposit, Tibet. *Earth Science*, 41(6): 999–1015 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.083>
- Li, S.C., Zhang, L.Y., Li, P.C., et al., 2017. Discovery and Tectonic Implications of Early Triassic O-Type Adakite in Middle of Great Xing'an Range. *Earth Science*, 42(12): 2117–2128 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.136>
- Lin, Q.C., Xia, B., Zhang, Y.Q., 2006. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of the Syn-Collisional 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, X.L., Li, W.C., Zhang, N., et al., 2014. Geochronological, Geochemical Characteristics of Disuga Ore-Forming I-Type Granitic Porphyries in the Geza Arc, Yunnan Province, and Their Geological Significance. *Geological Review*, 60(1): 103–114 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., 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 from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Ludwig, K.R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.
- Ou, J.J., 2014. Geological Significance and Ore Prospecting for Porphyry Copper Deposit in Lannitang, Shangri-La, Yunnan (Dissertation). Chengdu University of Technology, Sichuan, 67–69 (in Chinese with English abstract).
- Pan, G.T., Zhu, D.C., Yin, F.G., et al., 2005. The 32nd Session of the International Geological Conference: Focused on the Development of Tethys Geology. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 25(4): 99–107, 94 (in Chinese).
- Pang, Z.S., Du, Y.S., Wang, G.W., et al., 2009. Geological and Geochemical Feature and Petrogenesis of Pulang Complex, Yunnan Province, China. *Geological Bulletin of China*, 28(4): 531–537 (in Chinese with English abstract).
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Peccerillo, A., Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81. <https://doi.org/10.1007/bf00384745>
- Peng, H.J., 2014. Metallogeny of Hongniu-Hongshan Porphyry-Skarn Copper Deposit and the Porphyry-Skarn Metallogenic System of the Yidun Island Arc, Yunnan, SW China (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Peng, T.P., Zhao, G.C., Fan, W.M., et al., 2014. Zircon Geochronology and Hf Isotopes of Mesozoic Intrusive Rocks from the Yidun Terrane, Eastern Tibetan Plateau: Petrogenesis and Their Bearings with Cu Mineralization.

- zation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 80: 18 – 33.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.10.028>
- Ren, J.B., Xu, J.F., Chen, J.L., et al., 2011. Geochemistry and Petrogenesis of Pulang Porphyries in Sanjiang Region. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(4): 581 – 592 (in Chinese with English abstract).
- Rickwood, P.C., 1989. Boundary Lines within Petrologic Diagrams which Use Oxides of Major and Minor Elements. *Lithos*, 22 (4): 247 – 263. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(89\)90028-5](https://doi.org/10.1016/0024-4937(89)90028-5)
- Sha, J.Z., Luo, C.D., Wang, P., 2016. Tectonic Environment and Metallogenic Significance of Magmatite in Xuejiping Copper Mine, Northwest Yunnan. *Mineral Resources and Geology*, 30(5): 703 – 711 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42 (1): 313 – 345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Tang, G.J., Wang, Q., Zhao, Z.H., et al., 2009. Geochronology and Geochemistry of the Ore-Bearing Porphyries in the Baogutu Area (Western Junggar): Petrogenesis and Their Implications for Tectonics and Cu-Au Mineralization. *Earth Science*, 34 (1): 56 – 74 (in Chinese with English abstract).
- Wang, B.Q., Zhou, M.F., Li, J.W., et al., 2011. Late Triassic Porphyritic Intrusions and Associated Volcanic Rocks from the Shangri-La Region, Yidun Terrane, Eastern Tibetan Plateau: Adakitic Magmatism and Porphyry Copper Mineralization. *Lithos*, 127 (1 – 2): 24 – 38. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.07.028>
- Wang, S.X., Zhang, X.C., Leng, C.B., et al., 2008. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of the Pulang Porphyry Copper Deposit, Northwestern Yunnan, China: The Ore-Forming Time Limitation and Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (10): 2313 – 2321 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J., Li, F., Jiang, Y.G., et al., 2011. A Study on Petrological Geochemistry Features of Chundu Porphyry Body, Xianggelila, Yunnan Province, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 31 (3): 550 – 559 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, L., Shi, W.J., Li, H., et al., 2017. Geochemistry, Sr-Nd-Hf Isotopes and Petrogenesis of Mid-Late Triassic Baizhangzi Granitic Intrusive Rocks in Eastern Hebei-Western Liaoning Province. *Earth Science*, 42 (2): 207 – 222 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.016>
- Yang, F., Zou, G.F., Wu, J., et al., 2011. Ages and Geological Significance of the Porphyries in the Chundu Copper Mining Area in Zhongdian, Yunnan Province. *Geotectonica et Metallogenesis*, 35 (2): 307 – 314 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X.T., 2012. Geological Characteristics and Genesis Discussion of Chundu Porphyry Cu Deposit, Zhongdian, Yunnan Province (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y.Q., Hou, Z.Q., Huang, D.H., 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).
- Zeng, P.S., Li, W.C., Wang, H.P., et al., 2006. The Indosian Pulang Superlarge Porphyry Copper Deposit in Yunnan, China: Petrology and Chronology. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (4): 989 – 1000 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X.C., Leng, C.B., Yang, C.Z., et al., 2009. SHRIMP Geochronology and Geological Significance of Chundu Copper Mining Area in Zhongdian, Yunnan Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 29 (S1): 359 – 360 (in Chinese).
- Zhao, Z.D., Mo, X.X., Dilek, Y., et al., 2009. Geochemical and Sr-Nd-Pb-O Isotopic Compositions of the Post-Collisional Ultrapotassic Magmatism in SW Tibet: Petrogenesis and Implications for India Intra-Continental Subduction beneath Southern Tibet. *Lithos*, 113 (1 – 2): 190 – 212. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.02.004>
- Zhao, Z.H., 1985. Computing Method for Some Commonly Used REE Geochemistry Parameters and Geochemical Significance. *Geology-Geochemistry*, 13 (S1): 11 – 14 (in Chinese).
- Zou, G.F., Li, B., Xu, G.R., et al., 2012. Chronology and Geological Implications of Porphyries and Porphyry Copper Deposits in Chundu Area, Northwestern Yunnan. *Mineral Deposits*, 31 (S1): 643 – 644 (in Chinese).

附中文参考文献

- 曹殿华, 王安建, 黄玉凤, 等, 2009. 中甸弧雪鸡坪斑岩铜矿含矿斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成. *地质学报*, 83 (10): 1430 – 1435.
- 陈玲, 许继峰, 陈建林, 等, 2013. 云南中甸地区翁水晚三叠世火山岩地球化学特征及其构造意义. *岩石学报*, 29 (4): 1156 – 1166.
- 陈阳, 2016. 云南香格里拉阿热岩体地质地球化学特征及成矿性分析(硕士学位论文). 四川: 成都理工大学.
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等, 1996. 大陆根柱构造——大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社.
- 董毅, 2013. 云南香格里拉阿热岩体年代学与地球化学(硕士

- 论文).四川:成都理工大学.
- 董毅,刘显凡,邓江红,等,2012.中甸弧西班牙带印支期中酸性侵入岩成因与成矿意义.中国地质,39(4):887—899.
- 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.
- 黄肖潇,许继峰,陈建林,等,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.
- 姜文涛,李文昌,刘学龙,2014.西南格咱岛弧斑岩带烂泥塘斑岩铜矿床岩石地球化学特征.矿床地质,33(增刊):205—206.
- 赖安琦,李文昌,刘学龙,等,2016.云南格咱岛弧松诺石英二长斑岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义.地质论评,62(4):955—969.
- 冷成彪,张兴春,王守旭,等,2007.云南中甸地区两个斑岩铜矿容矿斑岩的地球化学特征——以雪鸡坪和普朗斑岩铜矿床为例.矿物学报,27(3—4):414—422.
- 冷秋锋,唐菊兴,郑文宝,等,2016.西藏拉抗俄斑岩 Cu-Mo 矿床含矿斑岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成.地球科学,41(6):999—1015.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.083>
- 李世超,张凌宇,李鹏川,等,2017.大兴安岭中段早三叠世 O 型埃达克岩的发现及其大地构造意义.地球科学,42(12):2117—2128.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.136>
- 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.
- 欧剑杰,2014.云南香格里拉烂泥塘斑岩型铜矿床地质特征及找矿方向(硕士学位论文).四川:成都理工大学.
- 潘桂棠,朱弟成,尹福光,等,2005.第 32 届国际地质大会聚焦特提斯地质研究进展.沉积与特提斯地质,25(4):99—107,94.
- 庞振山,杜杨松,王功文,等,2009.云南普朗复式岩体地球化学特征及成因.地质通报,28(4):531—537.
- 彭惠娟,2014.云南中甸红牛—红山斑岩—矽卡岩型铜矿床成矿过程及义敦岛弧斑岩—矽卡岩成矿系统研究(博士学位论文).北京:中国地质科学院.
- 任江波,许继峰,陈建林,等,2011.“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.
- 沙建泽,罗朝德,王朋,2016.滇西北雪鸡坪铜矿区岩浆岩大地构造环境及成矿意义.矿产与地质,30(5):703—711.
- 唐功建,王强,赵振华,等,2009.西准噶尔包古图成矿斑岩年代学与地球化学:岩石成因与构造、铜金成矿意义.地球科学,34(1):56—74.
- 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.
- 吴静,李峰,姜永果,等,2011.云南香格里拉春都斑岩体岩石地球化学特征研究.矿物学报,31(3):550—559.
- 熊乐,石文杰,李欢,等,2017.冀东—辽西中—晚三叠世柏枝子花岗质侵入岩地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素特征及岩石成因.地球科学,42(2):207—222.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.016>
- 杨帆,邹国富,吴静,等,2011.中甸春都铜矿区岩体成岩时代及地质意义.大地构造与成矿学,35(2):307—314.
- 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.
- 杨宪涛,2012.云南中甸春都斑岩铜矿床地质特征及矿床成因讨论(硕士学位论文).北京:中国地质大学.
- 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,29(增刊):359—360.
- 赵振华,1985.某些常用稀土元素地球化学参数的计算方法及其地球化学意义.地质地球化学,13(S1):11—14.
- 邹国富,李波,徐国端,等,2012.滇西北春都斑岩铜矿床侵入岩成岩时代及地质意义.矿床地质,31(增刊):643—644.