

“三江”地区中甸弧普朗成矿斑岩地球化学特征及其成因

任江波^{1,2}, 许继峰¹, 陈建林¹, 张世权³, 梁华英¹

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 云南省地质调查院, 云南 大理 671000)

摘要: 普朗斑岩铜矿床是中国西南“三江”地区新发现的具超大规模的印支期斑岩铜矿床, 其成矿岩体的斑岩具有高的 Sr 含量 ($289 \times 10^{-6} \sim 1200 \times 10^{-6}$, 平均值为 820×10^{-6})、Sr/Y (23~ 92) 和 La/Yb (平均值为 16.4) 比值和相对较高的 MgO 和 $Mg^\#$ 值 (> 59), 并富集大离子亲石元素和亏损高场强元素 (Nb、Ta、Ti) 等成分特征, 这与形成于俯冲岛弧环境埃达克岩的地球化学组成相似, 表明可能存在一个板片熔体在成岩和成矿过程中的贡献。同时高 Th/Y、Ba/La、Rb/Sr 和 Ba/Sr 比值, 以及相对较高的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 同位素比值 (0.70560~ 0.70574) 和较低的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($-2.85 \sim -2.20$), 指示有一个富集组分参与了成矿斑岩的形成过程, 这个富集组分可能是普朗地区的岛弧地壳基底物质, 也可能是俯冲沉积物。岛弧地壳物质或俯冲沉积物、或两者与板片熔融的埃达克质熔体进行了一定程度的相互作用, 导致成矿斑岩“混合”型地球化学的组成。初步提出, 普朗斑岩铜矿床可能是在东侧的甘孜-理塘洋晚三叠世俯冲过程中形成的, 俯冲作用在早期形成了具有岛弧成分特征的石英闪长玢岩, 其后板片熔融形成的埃达克质熔体增加, 并混合了一定数量的上覆地壳物质或沉积物, 产生了更酸性的、并具有较高氧逸度的埃达克岩岩浆, 上侵到普朗地区的地壳中形成成矿斑岩和相关的斑岩铜矿床。

关键词: 斑岩铜矿 Sr-Nd 同位素; 印支期; 普朗; 中甸弧

中图分类号: P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)04-0581-12

Geochemistry and petrogenesis of Pulang porphyries in Sanjiang region

REN Jiang-bo^{1,2}, XU Ji-feng¹, CHEN Jian-lin¹, ZHANG Shi-quan³ and LIANG Hua-ying¹

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Mineral Resources, Yunnan Bureau of Geological Survey, Dali 671000, China)

Abstract: Located in Zhongdian island arc belt in northwestern Yunnan Province, the Pulang superlarge porphyry copper deposit was formed in late Triassic during the westward subduction of the Gansu-Litang ocean plate below Zhongdian microplate. The mineralized rocks of the Pulang porphyry copper deposit mainly include quartz dioritic porphyries and quartz monzonitic porphyries in a complex pluton, and economic ores are mainly preserved in the quartz monzonitic porphyries. The quartz dioritic porphyrites were intruded by later quartz monzonitic porphyries, but the two kinds of rocks display similar geochemical characteristics, such as similar REE patterns, incompatible trace element patterns and initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratios, suggesting that they were cogenetic products or were derived from similar sources. Geochemically, both kinds of rocks are akin to adakite, as evidenced by such characteristics as high Sr content ($289 \times 10^{-6} \sim 1200 \times 10^{-6}$), high La/Yb and Sr/Yb ratios, relatively high MgO and $Mg^\#$ (> 59), depleted Y and Yb, slightly negative Eu anomalies and positive Sr

收稿日期: 2010-10-13; 修订日期: 2011-04-08

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 973 资助项目 (2009CB421004)

作者简介: 任江波 (1985-), 男, 硕士研究生, 地球化学专业, E-mail: doujlb222@163.com; 通讯作者: 许继峰, E-mail: jifengxu@gig.ac.cn.

anomalies. Moreover, the radiogenic Sr [$0.70560 < (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i < 0.70574$] and less radiogenic Nd [$-2.85 < \varepsilon\text{Nd}(t) < -2.20$] isotopic characteristics, together with high Th/Y, Ba/La, Rb/Sr, and Ba/Sr trace elements ratios, imply that enriched source components were involved during the formation of the porphyries. This enriched source was probably derived from the basement of arc crust or subducted sediments, and then some mixing processes possibility occurred between adakitic magmas and melts from sediments and/or arc crustal materials. A comparison between the quartz dioritic porphyrites and quartz monzonitic porphyries suggests that the former have low $\text{SiO}_2 (> 61.0\%)$ and $\text{K}_2\text{O} (2.2\% \sim 4.4\%)$, while the latter have high $\text{SiO}_2 (> 65.9\%)$ and $\text{K}_2\text{O} (3.5\% \sim 8.1\%)$. Therefore, the authors hold that the Pulang porphyry copper deposit was probably related to the westward subduction of Gansu-Litang oceanic plate during late Triassic. At the early stage of subduction, the quartz dioritic porphyries with subduction-related origin were formed firstly, then increasing adakitic magmas of slab melting were mixed with melts from subducted sediments or arc materials, producing more acid and high oxygen fugacity adakitic magmas, which finally intruded the upper crust below Pulang and promoted the mineralization of the Pulang porphyry copper deposit at the shallow level.

Key words: porphyry copper deposit; Sr-Nd isotope; Indosinian; Pulang; Zhongdian island arc

普朗斑岩铜矿是中甸弧近年来发现的一个超大型斑岩矿床,通常被认为是甘孜-理塘洋向西俯冲消减过程中形成的(曾普胜等,2004a;王守旭等,2007a;李文昌等,2007)。普朗斑岩铜矿与成矿密切相关的岩石主要为大面积分布的石英二长斑岩和石英闪长玢岩等。最近几年对该矿床开展了大量工作并取得很大进展,包括在年代学、地球化学、流体包裹体方面取得的一系列研究成果(曾普胜等,2004a,2006;李文昌等,2007;王守旭等,2007a,2007b,2008;冷成彪等,2008;郭欣等,2009;庞振山等,2009),但是由于普朗岩体还缺少系统的同位素地球化学研究,以至于难以约束成岩成矿物质的源区及相关的岩浆作用过程。为此在前人研究的基础上,本文重点补充了普朗成矿斑岩的 Sr-Nd 同位素研究,并结合前人对普朗复式岩体地球化学特征和区域岩浆-构造作用的研究成果,进一步探讨普朗成矿斑岩及矿床的形成过程。

1 地质背景

中甸弧位于“三江”地区义敦岛弧带南部,是“三江”构造-岩浆-成矿带的重要组成部分(曾普胜等,2004b),其东部和南部是甘孜-理塘板块结合带,西部是格咱-乡城断裂(图1a)。中甸弧具有义敦岛弧的一般特征,经历了印支期的洋壳俯冲、燕山期的陆陆碰撞和喜山期的陆内汇聚三大造山阶段(杨岳清等,2002;侯增谦等,2004)。中甸弧被认为是甘孜-理塘洋向西俯冲的产物,三叠系火山-地层详细记录

了该地区的印支期岩浆-构造事件。区内 NW 向构造十分发育,表现为 NW 向断裂及 NW 向褶皱,对地层和岩浆岩起着重要的控制作用。主要出露为三叠系地层-火山系统,下、中统为一套碎屑岩夹碳酸岩、硅质岩,上统为一套巨厚复理石砂板岩夹火山岩、碳酸岩;火山岩主要为晚三叠世以安山岩为主的钙碱性玄武岩和安山岩,分别分布于曲嘎寺组(T_{3q})和图姆沟组(T_{3t})中。和安山岩伴生的印支期中酸性浅成斑岩与成矿密切相关(杨岳清等,2002),主要是石英闪长玢岩、石英二长斑岩等。近几年高精度年龄研究结果显示,岛弧内印支期斑岩体主要形成于 210~220 Ma(曾普胜等,2003;林清茶等,2006;冷成彪等,2008;曹殿华等,2009;张兴春等,2009),与整个义敦岛弧印支期花岗岩峰值 215 Ma 非常一致(侯增谦等,2001)。

普朗超大型斑岩铜矿位于香格里拉县城东北方向约 36 km 处,出露于上三叠统图姆沟组二、三段地层中,交汇于 NW 向黑水塘断裂和隐伏的 NEE 向全干力达断裂部位(谭康华等,2005;范玉华等,2006)。普朗复式岩体是多阶段岩浆的产物,可分为三期岩浆侵入活动:最早的为大面积分布的石英闪长玢岩,约占 4/5;之后是复式岩体中心的石英二长斑岩及少量花岗闪长斑岩,约占 1/5;最后侵入的为脉状闪长玢岩(图1c)(王守旭等,2008)。普朗斑岩的矿化主要发生在石英二长斑岩体内,石英闪长玢岩局部也发生矿化,矿体与围岩呈渐变关系,无明显界线,矿石构造主要为细脉浸染状和网脉状分布,金属矿物主要有黄铜矿、黄铁矿、黄磁铁矿、辉钼矿和磁铁矿。

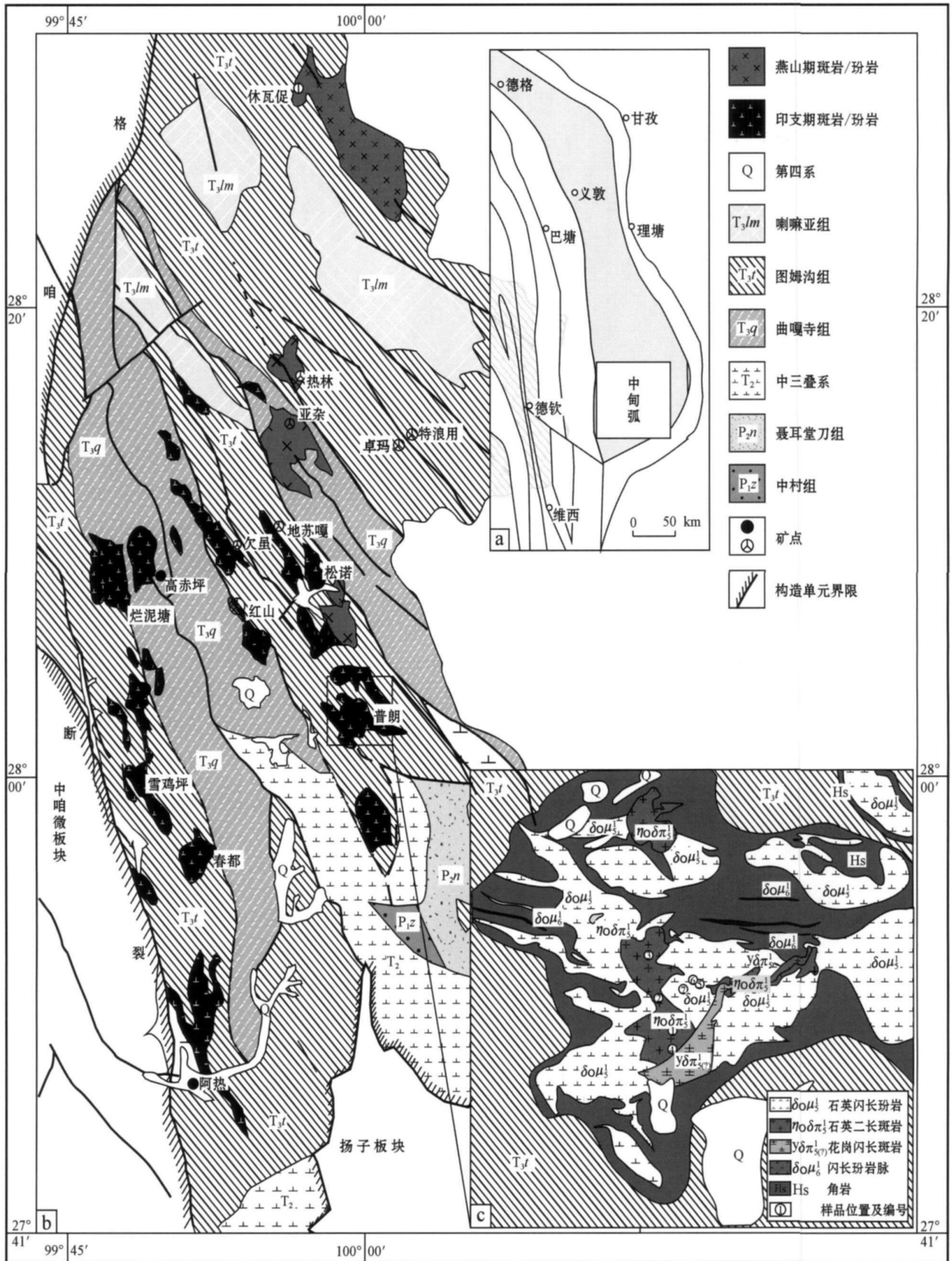


图 1 中甸岛弧大地构造位置 (a) 及地质简图 (b), 普朗复式斑岩地质图 (c) [据曾普胜等 (2003) 修改]

Fig. 1 Simplified geological map of Zhongdian island arc (a, b) and Pulang complex (c) (after Zeng Pusheng et al., 2003)

脉石矿物有钾长石、斜长石、石英、角闪石、黑云母、绿泥石、绢云母、绿帘石、方解石等(范玉华等, 2006; 王守旭等, 2008)。最晚期侵入的闪长玢岩脉贯穿于早期岩株状侵入体中, 无矿化现象(曾普胜等, 2004b; 李文昌等, 2007; 王守旭等, 2008)。普朗复式岩体具有典型的斑岩铜矿蚀变特征, 由内向外依次发育钾硅酸盐化、绢英岩化、青磐岩化(郭欣等, 2009), 图姆沟组砂板岩在岩体接触带上出现角岩化。普朗斑岩体确切的形成年代还存在争议, 石英闪长玢岩年龄 212.1~221.0 Ma, 其中锆石激光年龄为 221.0 Ma(庞振山等, 2009), $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 年龄为 212.1 Ma(李文昌等, 2009); 石英二长斑岩早期测得 K-Ar 年龄为 221.5~235.4 Ma(曾普胜等, 2006), 其锆石 SHRIMP 年龄为 226.0~228.4 Ma(王守旭等, 2008), 锆石激光年龄为 211.8 Ma(庞振山等, 2009), $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 年龄为 211.0 Ma(李文昌等, 2009)。

2 样品采集、处理及分析方法

研究样品采自于普朗复式岩体蚀变最弱的新鲜岩石(包括出露地表的岩体和钻孔岩芯), 包括与矿化密切相关的早期石英闪长玢岩和石英二长斑岩(采点及编号见图 1c)。石英闪长玢岩为灰色、灰黑色, 斑状结构, 块状构造, 斑晶以斜长石(20%~35%)、角闪石(3%~8%)、黑云母(约 2%)、石英(约 2%) 为主, 基质为显晶质, 以斜长石、钾长石、石英为主; 石英二长斑岩为灰色, 斑状结构, 块状构造, 斑晶以钾长石(10%~20%)、斜长石(8%~20%)、黑云母(约 2%)、石英(约 3%) 为主, 基质为显晶质, 以钾长石、斜长石、石英为主。选取新鲜样品, 碎至 5 mm 左右的颗粒, 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 目并用主量、微量和同位素分析。主量元素、微量元素和 Sr-Nd 同位素分析在中国科学院广州地球化学研究所分别用 X 荧光光谱、ICP-MS 和 TRITON 仪器上完成, 具体分析方法见 Chen 等(2010)。

3 分析结果

3.1 主量元素、微量元素特征

普朗复式岩体主要由石英闪长玢岩和石英二长斑岩组成, 主量元素、微量元素分析结果见表 1。在

硅碱图(图 2)中, 二者中除个别样品属于碱性系列外其余均属于钙碱性系列, 石英闪长玢岩相对石英二长斑岩贫硅(两者都大于 60%, 前者小于 65%, 后者大于 65%), 前者落入闪长-二长岩区域, 后者落入二长岩区域。两类岩石的 A/CNK 指数接近 1, 属于准铝质岩石, 均具有相对较高的 MgO (1.9%~3.74%) 和 $\text{Mg}^\#$ 值(大于 59), 在 $\text{MgO}-\text{SiO}_2$ 与 $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图(图 3)中具有与俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩相似的特征。然而石英闪长玢岩以相对富钠为主要特点(K_2O 为 3.49%~6.89%; Na_2O 为 3.80%~5.50%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 0.51~1.23), 石英二长斑岩以相对富钾为特点(K_2O 为 4.19%~8.05%; Na_2O 为 1.51%~3.24%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 1.47~5.33), 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图(图 3)中, 前者主要为钙碱性-钾钙碱性系列, 而后者主要位于高钾钙碱性-钾玄岩的特征系列, 且由于局部钾长石、黑云母增长等钾化而形成较大的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值范围。

普朗石英闪长玢岩与石英二长斑岩具有相似的稀土配分模式(图 4a), 轻稀土(LREE)和重稀土(HREE)分异明显[$9.4 < (\text{La}/\text{Yb})_N < 24.7$], 并且 LREE 分异明显[$2.7 < (\text{La}/\text{Sm})_N < 5.5$], HREE 无明显分异, Eu 显示微弱的负异常(Eu^* : 石英二长斑岩平均为 0.794, 石英闪长玢岩平均为 0.824)。石英二长斑岩相对于石英闪长玢岩具有较低的稀土含量(图 4a), 且前者随着 SiO_2 含量增加稀土含量呈现减小趋势, 被认为可能是矿化对于稀土元素的影响(王守旭等, 2007a)。

在微量元素蛛网图(图 4b)中, 石英闪长玢岩和石英二长斑岩均显示富集 Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素, Sr 具有明显的正异常特征, 大部分样品亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素(HFSE), 反映了俯冲组分(熔体或流体)对岩浆源区的影响(Wilson, 1989)。然而相比较而言, 石英闪长玢岩相对于石英二长斑岩具有更高的 Sr 含量(平均值前者为 962×10^{-6} , 后者为 860×10^{-6}), 和更低的 Rb/Sr 比值(平均值前者为 0.11, 后者为 0.30); 一般认为 Nb、Ta 亏损与来自俯冲板片的流体对地幔源区的交代作用有关(Bedard, 1999), 石英闪长玢岩 Nb、Ta 相对石英二长斑岩亏损更为强烈, 反映了俯冲组分中相对更多的流体参与。

3.2 Sr-Nd 同位素地球化学

普朗复式岩体主要岩石的 Sr-Nd 同位素数据见表 2, 石英闪长玢岩与石英二长斑岩具有窄的初始

表 1 普朗复式岩体主要岩石的主量 ($w_B/\%$)、微量 ($w_B/10^{-6}$) 元素分析结果
Table 1 Composition of major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) elements in Pulang complex porphyry

岩性 样品号 序号	石英二长斑岩				石英闪长玢岩		
	P-125	Zk-105	Pl-14	P-06	Z-690	Pl-03	Pl-10
	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	68.32	66.53	66.39	65.85	61.02	63.10	62.80
TiO ₂	0.64	0.58	0.47	0.61	0.73	0.75	0.73
Al ₂ O ₃	12.94	14.37	16.00	12.53	14.78	14.80	14.66
Fe ₂ O ₃ ^T	3.15	3.57	2.85	3.34	5.63	3.49	4.56
MgO	2.70	2.46	1.90	2.43	3.48	3.74	3.73
MnO	0.01	0.01	0.03	0.02	0.07	0.05	0.05
CaO	0.77	1.75	3.31	0.82	4.90	5.78	3.97
Na ₂ O	1.51	3.24	3.80	5.56	2.84	4.25	2.94
K ₂ O	8.05	5.17	3.49	6.89	4.19	2.20	4.39
P ₂ O ₅	0.29	0.34	0.17	0.28	0.35	0.38	0.35
L. O. I	1.02	1.42	1.02	1.11	1.45	0.88	1.25
Total	99.41	99.44	99.41	99.44	99.43	99.41	99.42
Mg [#]	66.62	61.69	60.77	62.86	59.00	71.42	65.61
Cr	39.36	175.1	23.22	39.85	60.01	56.78	62.57
Ni	13.05	15.04	16.52	14.22	21.36	20.68	23.09
Cu	6327	1877	49.2	4995	780	47.1	86.3
Rb	263.0	160.6	111.2	248.8	115.0	59.4	158.6
Sr	317	601	1141	396	1001	1043	880
Y	8.315	15.1	12.43	9.54	16.52	19.68	16.21
Zr	162.4	172.5	173.9	183	171	176.7	144.3
Nb	11.35	12.5	9.10	12.24	10.45	11.40	11.01
Ba	1303	1257	1311	1347	2298	1346	2231
La	9.60	31.21	29.48	15.59	37.91	33.24	37.07
Ce	20.26	60.43	55.51	29.79	73.26	68.16	69.38
Pr	2.57	7.05	6.14	3.64	8.45	8.29	8.20
Nd	10.64	25.98	21.56	13.93	30.58	31.45	30.13
Sm	2.30	5.04	3.78	2.80	5.86	6.51	5.86
Eu	0.41	1.14	0.92	0.56	1.39	1.57	1.46
Gd	1.91	3.78	3.04	2.38	4.55	5.50	5.08
Tb	0.27	0.54	0.41	0.32	0.61	0.72	0.64
Dy	1.48	2.85	2.27	1.78	3.23	3.75	3.28
Ho	0.28	0.53	0.43	0.33	0.58	0.70	0.58
Er	0.75	1.41	1.20	0.89	1.50	1.79	1.56
Tm	0.10	0.22	0.18	0.13	0.22	0.26	0.23
Yb	0.73	1.39	1.23	0.90	1.44	1.70	1.47
Lu	0.12	0.22	0.19	0.15	0.22	0.26	0.24
Hf	4.83	5.31	4.80	5.57	4.63	4.86	4.27
Ta	0.99	1.07	0.82	1.09	0.77	0.94	0.96
Pb	11.46	9.28	12.70	12.27	15.48	7.06	8.88
Th	13.61	19.23	11.85	18.42	14.04	14.80	15.15
U	1.60	3.90	2.88	4.88	3.47	3.27	3.67

注: Fe₂O₃^T 为全铁; Mg[#] = 100 × MgO / (MgO + Fe₂O₃^T)。

Sr-Nd 同位素组成范围, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 为 0.705 60~0.705 74, εNd(t) 为 -2.85~ -2.20, 计算初始 Sr、Nd 同位素比值所用年龄为 215 Ma (待刊)。其中 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值相对于地幔组分稍高, 然而远远低于义敦岛弧中北段弧后区壳源花岗岩初始值 (0.707 < I_{Sr} < 0.725) (Qu *et al.*, 2002; 曲晓明等, 2003);

εNd(t) 变化范围在 -2.85~ -2.20 之间, 明显高于义敦岛弧印支期稻城斑岩和花岗岩 [-8.10 < εNd(t) < -3.27] (Liu *et al.*, 2006) 以及义敦岛弧中北段壳源花岗岩 Nd 组成 [-8.40 < εNd(t) < -5.14] (Qu *et al.*, 2002), 即初始 Sr-Nd 同位素比值落入壳幔混合区域。

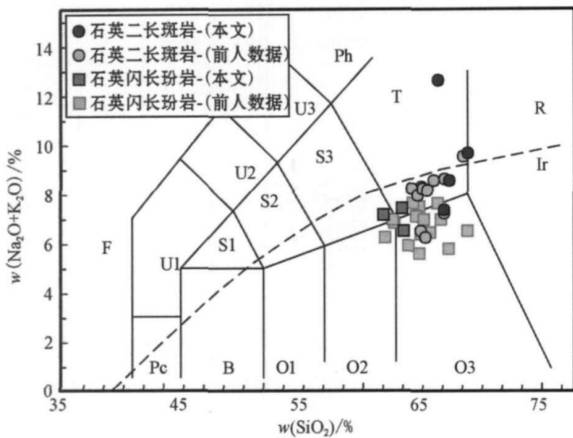


图2 普朗复式岩体岩石的 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图[原图据 Le Bas 等(1986); 前人数据来源: 李青(2009), 庞振山等(2009)]

Fig. 2 TAS classification of Pulang porphyry (after Le Bas *et al.*, 1986; previous data from Li Qing, 2009 and Pang Zhenshan *et al.*, 2009)

Pc—苦橄岩玄武岩; B—玄武岩; T—粗面岩和粗面英安岩; U1—碧玄岩和碱玄岩; U2—响岩质碱玄岩; U3—碱玄质响岩; Ph—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; R—流纹岩

Pc—picritic basalt; B—basalt; T—trachyte; U1—basanite; U2—phonotephrite; U3—tephritic phonolite; Ph—phonolite; O1—basaltic andesite; O2—andesite; O3—dacite; S1—trachybasalt;

S2—basaltic trachyandesite; S3—trachyandesite; R—rhyolite

4 讨论

4.1 形成时代与构造背景

中甸弧内与成矿具有密切关系的岩石以石英闪长玢岩和石英二长斑岩为主, 矿体主要赋存于石英二长斑岩中。随着近几年对中甸弧内多个斑岩铜矿的年代学研究成果的积累, 发现它们形成主体的时限为 220~210 Ma, 如雪鸡坪石英闪长玢岩和石英二长斑岩锆石 SHRIMP 年龄分别为 215.3 ± 2.3 Ma (林清茶等, 2006) 和 215.2 ± 1.9 Ma (曹殿华等, 2009), 春都石英二长斑岩锆石 SIMS 年龄为 219.7 ± 1.8 Ma (张兴春等, 2009), 中甸弧斑岩体系年代统计均值为 215.5 ± 1.8 Ma (曾普胜等, 2003; 林清茶等, 2006; 冷成彪等, 2008; 曹殿华等, 2009; 张兴春等, 2009) (图 5)。普朗超大型斑岩铜矿是中甸弧最典型的斑岩铜矿, 野外地质现象和年代学研究成果显示普朗石英闪长玢岩早于石英二长斑岩形成(曾普胜等, 2006; 李青等, 2009; 李文昌等, 2009; 庞振山

等, 2009), 最新研究成果显示这两类岩石的形成时代是非常接近的(锆石年龄分别为 217 Ma 和 215 Ma, 待刊), 如果考虑到甘孜-理塘洋俯冲时限(237~206 Ma) (侯增谦等, 2001, 2004), 普朗斑岩复式岩体应形成于俯冲作用晚期阶段。

4.2 岩石成因

4.2.1 板片熔体的存在

普朗复式岩体形成于甘孜-理塘洋俯冲时期, 地球化学特征上强烈亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素, 反映出俯冲岛弧岩石的特征(曲晓明等, 2010), 被认为是一套俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩(王守旭等, 2007; 冷成彪等, 2007)。笔者新的地球化学数据并结合前人研究成果显示, 普朗成矿斑岩和玢岩具有类似于埃达克岩的地球化学特征(图 6), 如高的 $\text{SiO}_2 (> 61\%)$ 、Sr 含量($289 \times 10^{-6} \sim 1200 \times 10^{-6}$, 平均值为 820×10^{-6})、高 Sr/Y 比值(23~92), 高 MgO 和 $\text{Mg}^\# (1.74 < \text{MgO} < 3.74, \text{Mg}^\# > 57)$, 低 HREE 和 Y ($8.3 \times 10^{-6} \sim 19.7 \times 10^{-6}$), 轻重稀土分离明显[(La/Yb)_N 平均值为 16.4], 无明显的 Eu 负异常(图 4)。同时在 $\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 及 $\text{MgO} - \text{SiO}_2$ 图解(图 3)中, 普朗复式岩体具有与形成于洋壳熔融的埃达克岩相似的特征(图 3) (Martin *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2007; Hou *et al.*, 2009)。埃达克岩的发现及实验研究表明, 中酸性岩石的高 Mg 是熔体与地幔楔橄榄岩平衡的结果, 不可能由地幔楔橄榄岩形成的玄武岩浆分异结晶作用产生(Rapp *et al.*, 1999; Martin *et al.*, 2005; 赵振华等, 2007), 因此, 普朗成矿斑岩具有类似于洋壳熔融形成的部分埃达克岩的地球化学特征, 说明板片熔体在普朗斑岩铜矿床成岩与成矿过程中具有一定的贡献。

4.2.2 富集组分的加入

形成于洋壳熔融的埃达克岩往往具有 MORB 的 $\text{Sr} - \text{Nd}$ 同位素特征, 然而普朗具有不同于典型埃达克岩的初始 $\text{Sr} - \text{Nd}$ 同位素, 其($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 变化为 0.70560~0.70574, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 变化为 -2.85~-2.20, 显示出相对高的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 和相对较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值。同时, 相对于俯冲洋壳部分熔融形成的埃达克岩具有的富钠贫钾特征, 普朗成矿岩体显示为富钾贫钠(图 3)。因此本文认为普朗成矿斑岩的形成可能有埃达克熔体的贡献, 但并非全部都是俯冲洋壳直接板片熔融的产物, 很可能是俯冲板片部分熔融形成的岩浆在源区或者上升过程中受到了一个或多个富集组分的混染或混合。俯冲沉积物具有

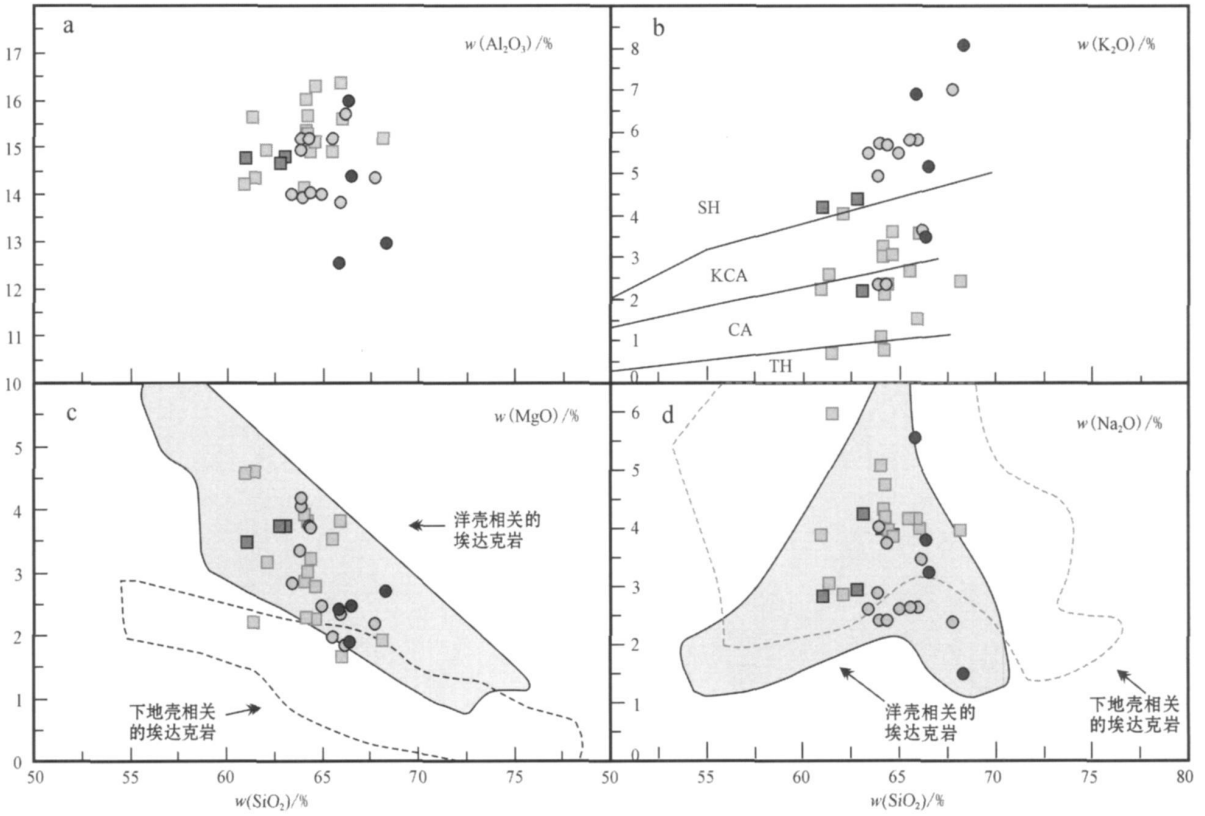


图 3 普朗复式岩体岩石的主量元素相关图解[原图据 Hou 等(2009), 图例同图 2]

Fig. 3 Relationship of major elements in Pulang porphyry (after Hou *et al.*, 2009, data sources and symbols as for Fig. 2)

表 2 普朗复式岩体岩石的 Sr-Nd 同位素组成

Table 2 Sr-Nd isotopic composition of Pulang complex porphyry

岩性 样品号	石英二长斑岩			石英闪长玢岩	
	P-125	Zk-105	PL-06	Z-690	Pt-03
$w(\text{Rb}) / 10^{-6}$	263	161	249	115	59.4
$w(\text{Sr}) / 10^{-6}$	317	601	396	1 001	1 043
$w(\text{Sm}) / 10^{-6}$	2.30	5.04	2.80	5.86	6.51
$w(\text{Nd}) / 10^{-6}$	10.64	25.98	13.93	30.58	31.45
$(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_m$	2.404 02	0.773 19	1.816 65	0.332 24	0.164 75
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_m$	0.712 958	0.708 009	0.711 295	0.706 613	0.706 241
ρ	0.000 007	0.000 006	0.000 006	0.000 006	0.000 007
$(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_m$	0.130 79	0.117 37	0.121 34	0.115 82	0.125 08
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_m$	0.512 402	0.512 303	0.512 386	0.512 412	0.512 419
ρ	0.000 007	0.000 005	0.000 004	0.000 004	0.000 008
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.705 608	0.705 78	0.705 741	0.705 598	0.705 738
$\epsilon \text{Sr}(t)$	19.27	20.504	22.919	19.384	21.151
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	0.512 22	0.512 21	0.512 22	0.512 25	0.512 25
$\epsilon \text{Nd}(t)$	- 2.80	- 2.83	- 2.85	- 2.20	- 2.29
T_{DM}/Ga	1.38	1.22	1.26	1.15	1.26

高的 Nd/Sm 比值和 Rb/Sr 比值 (Ling *et al.*, 2009), 最近几年的研究人们已经认识到, 流体与沉

积物的参与能够使板片熔体形成相对富集的 Sr-Nd 同位素特征 (李金祥等, 2008; Ling *et al.*, 2009)。在

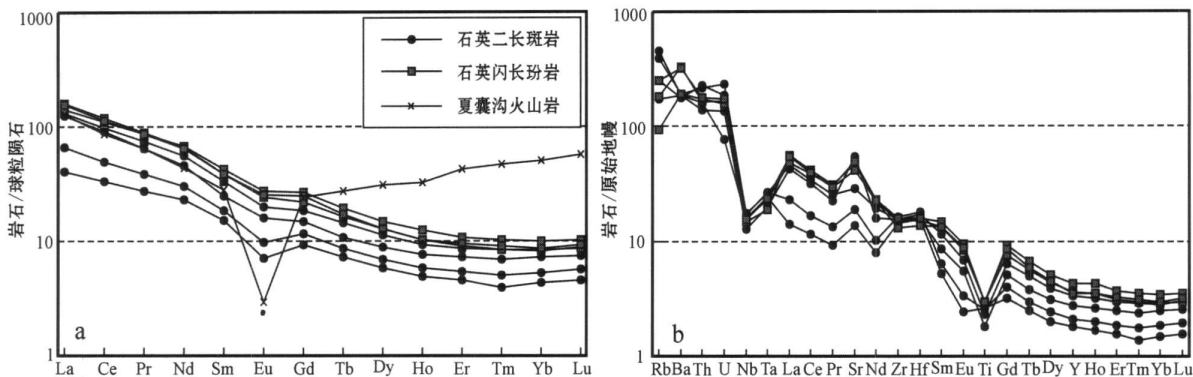


图4 稀土元素球粒陨石标准化(a)和微量元素地幔标准化图(b)[标准化数据 Sun 和 McDonough(1989)]

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primary mantle normalized trace element patterns(b) (normalized data after Sun and McDonough, 1989)

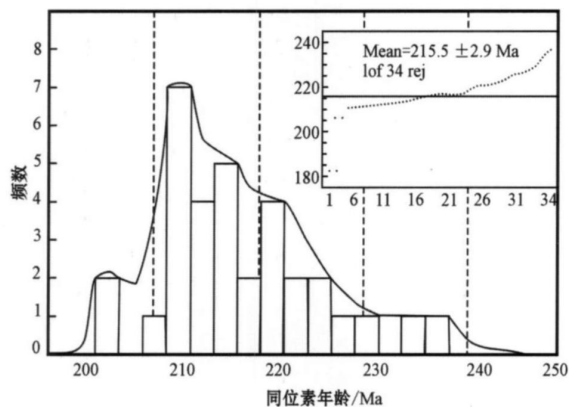


图5 中甸地区印支期成矿斑岩体年代学统计图

Fig. 5 Isotopic age statistics of Zhongdia porphyry system
数据来源: 曾普胜等(2003, 2006); 林清茶等(2006); 李文昌等(2007); 王守旭等(2008); 冷成彪等(2008); 李文昌等(2009); 曹殿华等(2009); 庞振山等(2009); 张兴春等(2009)
Data sources: Zeng *et al.*, 2003, 2006; Lin *et al.*, 2006; Li and Zeng, 2007; Wang *et al.*, 2008; Leng *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2009; Cao *et al.*, 2009; Pang *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2009

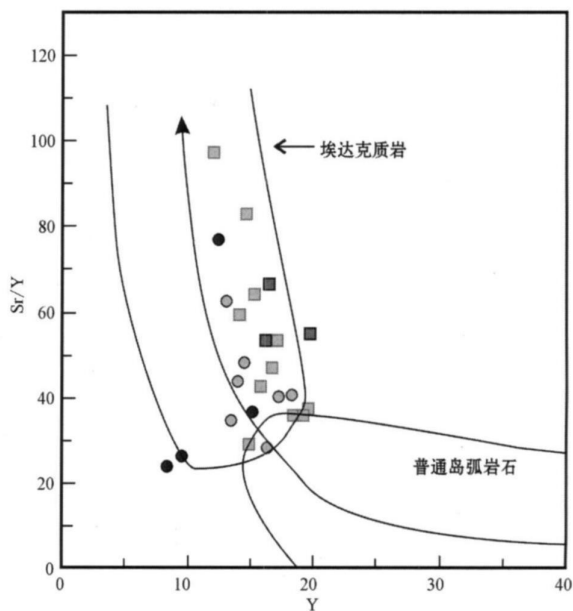


图6 普朗复式岩体的 Sr/Y-Y 图

[原图据 Xu 等(2002), 图例同图 2]

Fig. 6 Sr/Y-Y versus Y diagram for Pulang porphyry (after Xu *et al.*, 2002, data sources and symbols as for Fig. 2)

Th/Yb-Ba/La 图中, 高 Th/Yb 比值代表着有沉积物或其熔体参与的岛弧熔岩, 而 Ba 作为流体中易迁移的元素, 高的 Ba/La 反映为流体交代参与的岛弧产物 (Zhao *et al.*, 2009), 普朗复式岩体相对 MORB 具有相对高的 Th/Yb 和 Ba/La 比值 (图 7), 暗示流体和沉积物在这两类岩石成因上起到一定的作用。另外, 岩浆上升过程中, 由于密度差导致深部岩浆停留于壳幔分界并与地壳基底发生混染作用 (Richards, 2003), 与古老地壳发生同化混染作用同样可以形成相似的 Sr/Nd 同位素特征, 曲晓明利用 Sr/Nd 同位素显示出义敦岛弧具有古老的沉积基底地壳 (Qu *et al.*, 2002; 曲晓明等, 2003)。另外, 普朗

复式岩体高的 T_{DM} 值 (1.15~1.38 Ga) 也暗示有部分古老附件组分的参与。因此, 初步认为普朗地球化学特征可能是岛弧地壳物质或俯冲沉积物、或两者与洋壳熔融的埃达克质熔体进行了一定程度的相互作用, 从而形成了成矿斑岩的“混合”型地球化学组成。

4.2.3 岩浆过程

目前对于中甸岛弧斑岩矿床的形成较为一致的

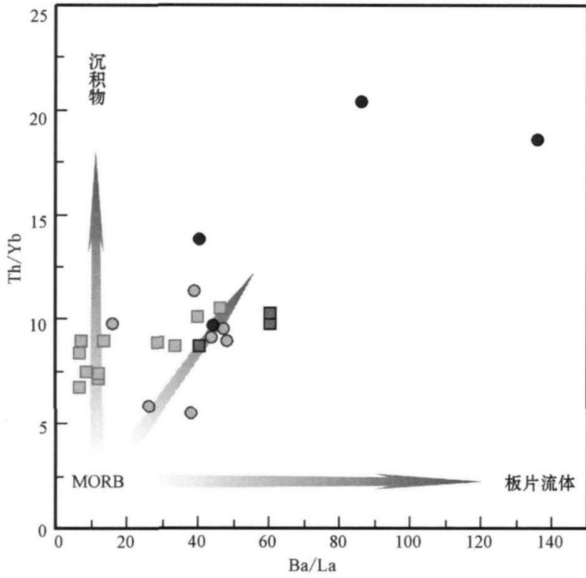


图 7 普朗复式岩体岩石的 Th/Yb-Ba/La 图
[底图据 Zhao 等(2009), 图例同图 2]

Fig. 7 Diagram of Th/Yb versus Ba/La for Pulang porphyry (after Zhao *et al.*, 2009, data sources and symbols as for Fig. 2)

认识是印支期甘孜-理塘洋向西俯冲于中甸板块之下, 俯冲作用形成了大量的安山岩并伴随着与成矿关系密切相关的石英闪长玢岩和石英二长斑岩。普朗复式岩体中石英闪长玢岩与石英二长斑岩具有非常一致的 Sr-Nd 同位素(图 8)和稀土元素配分模式以及蛛网图模式(图 4), 代表它们来自相近的源区并经历相似的岩浆过程, 被认为是壳幔混源岩浆逐步演化的结果(杨岳清等, 2002; 庞振山等, 2009)。笔者新的研究显示石英闪长玢岩与石英二长斑岩同时具有岛弧地壳物质或俯冲沉积物, 或两者与洋壳熔融形成的埃达克质岩浆相互作用的“混合”型地球化学特征, 可能的途径是大洋沉积物随着俯冲板片带到深部与大洋板片一起熔融形成的岩浆源, 另一种途径是俯冲板片熔融在上升过程中与地壳物质相互作用的产物。微观上石英闪长玢岩相对石英二长斑岩 Nb、Ta、Ti 等高场强元素亏损更为强烈(图 4b), 同时具有相对较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ (图 8), 以及较低的 Rb/Sr、Ba/Sr 比值(图 9), 反映了石英闪长玢岩可能具有相对更多的流体参与, 而石英二长斑岩则具有相对较多的沉积物参与。从目前资料看, 普朗复式岩体可能的形成轨迹为, 甘孜-理塘俯冲晚期在普朗地区开始主要以安山质岩浆在地壳浅部形成石英闪

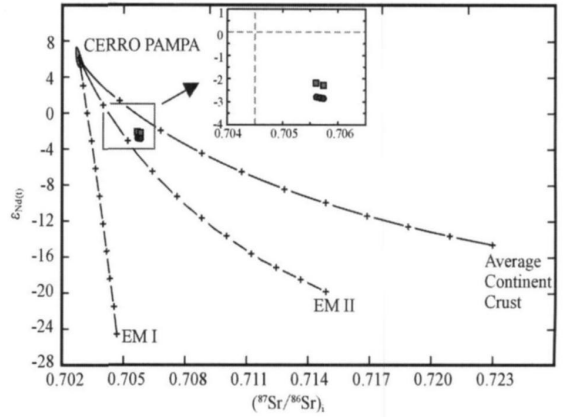


图 8 普朗复式岩体岩石的 Sr-Nd 同位素混合模拟
Fig. 8 Sr-Nd isotope mixing model of adakite of Pulang porphyry

底图据 Ling 等(2009)修改, 端员组分 EM I、EM II 及 Average Continent Crust 分别代表 I 型富集地幔、II 型富集地幔以及平均地壳, 数据来自 Ling 等(2009), CERRO PAMPA 代表较纯的洋壳熔融 adakite, 数据来自 Kay 等(1993)。图例同图 2
Mixing model and end members after Ling *et al.*, 2009 and Kay *et al.*, 1993. The Sr-Nd isotope composition of CERRO PAMPA adakite used in mixing model is considered to have some of clearest slab-melt geochemical signatures. The mixing relationship in the diagram is between CERRO PAMPA and EM I and EM II. Data sources and legends as for Fig. 2

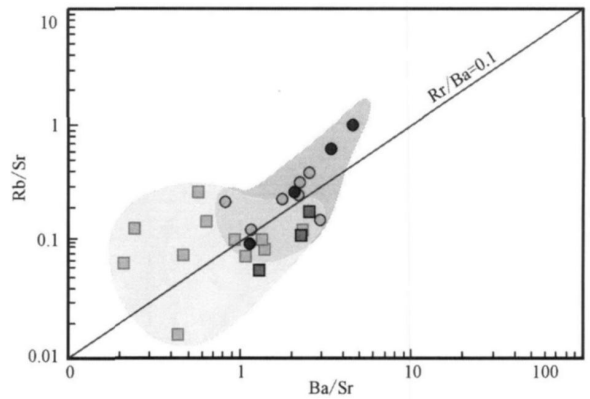


图 9 普朗复式岩体岩石的 Rb/Sr-Ba/Sr 图
[底图据曲晓明等(2010), 图例同图 2]

Fig. 9 Rb/Sr-Ba/Sr diagram of Pulang porphyries after Qu *et al.*, 2010, data sources and symbols as for Fig. 2)

长玢岩, 后期板片熔融形成的熔体增多导致岩浆更酸性(王守旭等, 2007a), 板片熔融形成的埃达克质熔体在源区或者上升过程中混合了一定数量的俯冲沉积物或者地壳物质, 并且由钙碱性-高钾钙碱性向高钾钙碱性 钾玄岩演化(图 3), 这种更酸性并具有相对较高氧逸度的混合岩浆在普朗地区形成石英二长斑岩及相关的斑岩铜矿床。

4.3 普朗斑岩铜矿的成矿机制及意义

世界级规模的斑岩铜矿都产于岛弧或陆缘弧环境,如 Bingham, USA; Chuquicamata, La Escondida, El Teniente, Chile; Bajo de la Alumbrera, Argentina (Ulrich and Heinrich, 2002; Richards, 2003), 基于板块理论建立起的著名的岛弧-斑岩成矿模型(Sillitoe, 1972; Sillitoe and Bonham, 1984)有效指导了找矿工作。俯冲板片熔融形成的埃达克质岩浆普遍具有高的氧逸度(Mungall, 2002; 王强等, 2008), 岩浆上升进入富金属地幔楔时, 将会导致地幔橄榄岩氧逸度增高, 从而释放 Cu、Au 等元素到岩浆中, 以络合物的形式随着岩浆一起迁移(Sun *et al.*, 2004; 唐功建等, 2009), 最终在地壳浅部有利位置形成矿床。

普朗地区在晚三叠世时期为岛弧环境或活动大陆边缘背景, 形成在甘孜-理塘古特提斯洋的西向俯冲消减过程中, 因此中甸岛弧的普朗地区该时期具有产出超大型斑岩矿床的地质背景条件。另外普朗岩体的成矿斑岩特别是石英二长斑岩具有较明显的埃达克质成分特征, 说明有俯冲洋壳发生板片熔融的埃达克质熔体的参与, 这是普朗岩体能够成矿的另外一个重要因素。其三就是成矿的石英二长斑岩可能混合有俯冲沉积物, 沉积物中富含水, 为后期岩浆-热液过程提供有利的环境, 最终形成超大型斑岩矿床。因此, 主体成矿的石英二长斑岩保留有埃达克质熔体的地球化学特征, 又显示出俯冲沉积物的成分特征, 可能只有同时具有埃达克质熔体和俯冲沉积物“混合型”成分特征的岩浆才能在普朗地区形成大型或超大型矿床, 而仅具有埃达克质特征或者仅保留俯冲沉积物特征的岩浆可能不利于斑岩矿床的形成。

5 结论

(1) 普朗复式岩体具有部分埃达克岩的地球化学特征, 甘孜-理塘洋俯冲洋壳部分熔融物对普朗成矿斑岩具有重要的贡献。

(2) Sr-Nd 同位素及微量元素特征显示, 普朗复式岩体具有岛弧地壳物质或俯冲沉积物、或两者与洋壳熔融形成的埃达克质熔体相互作用的“混合”型地球化学特征。

致谢 云南省地调局在野外工作中给予了大量的指导和协助, 评审专家以及刘希军博士对本文提

出了宝贵修改意见和建议, 笔者在此一并表示衷心感谢。

References

- Bedard J.H. 1999. Petrogenesis of boninites from the Betts Cove Ophiolite, Newfoundland, Canada: Identification of subducted source components[J]. *Journal of Petrology*, 40(12): 1853~1889.
- Cao Dianhua, Wang Anjian, Huang Yufeng, *et al.* 2009. Shrimp Geochronology and Hf Isotope Composition of Zircons from Xuejiping porphyry Copper Deposit, Yunnan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1430~1435(in Chinese with English abstract).
- Chen Jianlin, Xu Jifeng, Wang Baodi, *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? [J]. *Chemical Geology*, 273: 286~299.
- Fan Yuhua and Li Wenchang. 2006. Geological characteristics of the Pulang Porphyry Copper Deposit, Yunnan[J]. *Geology in China*, 33(2): 352~362(in Chinese with English abstract).
- Guo Xin, Du Yangsong, Pang Zhenshan, *et al.* 2009. Characteristics of the ore-forming fluids in alteration zones of the Pualng porphyry copper deposit in Yunnan Province and its metallogenic significance[J]. *Geoscience*, 23(3): 465~471(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Zhou Jirong, *et al.* 2001. Collision-oregenic process of the Yidun arc in the Sanjiang region: record of granites[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75: 484~497(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Yang Yueqing, Qu Xiaoming, *et al.* 2004. Tectonic evolution and mineralization systems of the Yidun arc orogen in Sanjiang Region, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 109~120 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Yang Zhiming, Qu Xiaoming, *et al.* 2009. The Miocene Gangdese porphyry copper belt generated during post-collisional extension in the Tibetan Orogen[J]. *Ore Geology Reviews*, 36(1~3): 25~51.
- Kay S, Ramos V and Marquez M. 1993. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab melting prior to ridge trench collision in southern South America[J]. *The Journal of Geology*, 101(6): 703~714.
- Le Bas M J, Maitre R, Streckeisen A, *et al.* 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. *Journal of Petrology*, 27(3): 745~750.
- Leng Chengbiao, Zhang Xingchun, Wang Shouxu, *et al.* 2008. Shrimp zircon U-Pb dating of the Songnuo ore-hosted porphyry, Zhongdian, northwest Yunnan, China and its geological implication[J]. 32(1): 124~130(in Chinese with English abstract).
- Li Jinxiang, Li Guangming, Qin Kezhang, *et al.* 2008. Geochemistry of porphyries and volcanic rocks and ore forming geochronology of Duobuza gold-rich porphyry copper deposit in Ban gonghu belt, Tibet: Constraints on metallogenic tectonic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(23): 531~543(in Chinese with English ab-

- stract).
- Li Qing. 2009. porphyry characteristics and metallogenic significance of Pulang porphyry copper deposit[D]. Beijing: China University of Geoscience(in Chinese with English abstract).
- Li Wenchang and Zeng Pusheng. 2007. Characteristics and metallogenic model of the Pulang superlarge porphyry copper deposit in Yunnan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 34(4): 436~446(in Chinese with English abstract).
- Li Wenchang, Yin Guanghou, Lu Yingxiang, *et al.* 2009. The Evolution and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Isotopic Evidence of the Pulang Complex in Zhongdian[J]. Acta Geologica Sinica, 83(10): 1421~1429(in Chinese with English abstract).
- Lin Qingcha, Xia Bin and Zhang Yuquang. 2006. Zircon Shrimp U-Pb dating of the syn-collision Xuejiping quartz diorite porphyrite in Zhongdian, Yunnan, China, and its geological implication[J]. Geological Bulletin of China, 25(1~2): 133~137(in Chinese with English abstract).
- Ling Mingxin, Wang Fangyue, Ding Xin, *et al.* 2009. Cretaceous ridge subduction along the Lower Yangtze River Belt, Eastern China[J]. Economic Geology, 104(2): 303~321.
- Liu Shuwen, Wang Zongqi, Yan Quanren, *et al.* 2006. Indosinian tectonic setting of the Southern Yidun Arc: Constraints from SHRIMP zircon chronology and geochemistry of dioritic porphyries and granites[J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 80(3): 387~399.
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, *et al.* 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution[J]. Lithos, 79(1~2): 1~24.
- Mungall J E. 2002. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits[J]. Geology, 30(10): 915~918.
- Pang Zhenshan, Du Yangsong, Wang Gongwen, *et al.* 2009. Single grain zircon U-Pb isotopic ages, Geochemistry and its implication of the Pulang complex in Yunnan Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(1): 159~165(in Chinese with English abstract).
- Qu Xiaoming, Hou Zengqian and Tang Shuanghua. 2003. Age of intraplate volcanism in the back-arc area of Yidun island arc and its significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 22: 131~137(in Chinese with English abstract).
- Qu Xiaoming, Hou Zengqian and Zhou Shuigui. 2002. Geochemical and Nd, Sr Isotopic Study of the Post-Orogenic Granites in the Yidun Arc Belt of Northern Sanjiang Region, Southwestern China[J]. Resource Geology, 52(2): 163~172.
- Qu Xiaoming, Jiang Junhua, Xing Hongbo, *et al.* 2010. A study of two groups of adakite almost simultaneously formed in gangdese collisional orogen, Tibet: Why does one group contain copper mineralization and the other not? [J]. Mineral Deposits, 29(3): 381~394(in Chinese with English abstract).
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, *et al.* 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa[J]. Chemical Geology, 160(4): 335~356.
- Richards J P. 2003. Tectonic-magmatic precursors for porphyry Cu (Mo-Au) deposit formation[J]. Economic Geology, 98: 1515~1533.
- Sillitoe R and Bonham H. 1984. Volcanic landforms and ore deposits [J]. Economic Geology, 79(6): 1286~1298.
- Sillitoe R H. 1972. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits[J]. Economic Geology, 67(2): 184~197.
- Sun S and McDonough W. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society London Special Publications, 42(1): 313~345.
- Sun Weidong, Arculus R J, Kamenetsky V S, *et al.* 2004. Release of gold-bearing fluids in convergent margin magmas prompted by magnetite crystallization[J]. Nature, 431(7011): 975~978.
- Tan Kanghua, Li Guangjun, Huang Dingzhu, *et al.* 2005. The Ore Collision Conditions of Large Scale Pulang Porphyry Copper Deposit [J]. Yunnan Geology, 24(2): 167~174(in Chinese with English abstract).
- Tang Gongjian, Wang Qiang, Zhao Zhenhua, *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[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 34(1): 56~74(in Chinese with English abstract).
- Ulrich T and Heinrich C A. 2002. Geology and alteration geochemistry of the porphyry Cu-Au deposit at Bajo de la Alumbrera, Argentina [J]. Economic Geology, 97(8): 1865~1888.
- Wang Qiang, Tang Gongjian, Jia Xiaohui, *et al.* 2008. The Metalliferous Mineralization Associated with Adakitic Rocks[J]. Geological Journal of China Universities, 14: 350~364(in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Wyman D A, Xu J F, *et al.* 2007. Partial melting of thickened or delaminated lower crust in the middle of eastern China: Implications for Cu-Au mineralization[J]. Journal of Geology, 115(2): 149~161.
- Wang Shouxu, Zhang Xingchun, Leng Chengbiao, *et al.* 2007a. A tentative study of ore geochemistry and ore-forming mechanism of Pulang porphyry copper deposit in Zhongdian, northwestern Yunnan [J]. Mineral Deposits, 26(3): 277~288(in Chinese with English abstract).
- Wang Shouxu, Zhang Xingchun, Leng Chengbiao, *et al.* 2008. Zircon Shrimp U-Pb dating of Pulang porphyry copper deposit, northwestern Yunnan, China: The ore-forming time limitation geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 24: 2313~2321(in Chinese with English abstract).
- Wang Shouxu, Zhang Xingchun, Qin Caojian, *et al.* 2007b. Fluid inclusions in quartz veins of Pulang porphyry copper deposit, Zhongdian, Northwestern Yunnan[J]. Geochemica, 36(5): 467~478(in Chinese with English abstract).
- Wilson M. 1989. Igneous Petrogenesis[M]. London: Unw in Hyman.
- Xu Jifeng, Shinjo R, Defant M J, *et al.* 2002. Origin of Mesozoic

- adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? [J]. *Geology*, 30 (12): 1 111~ 1 114.
- Yang Yueqing, Hou Zengqian, Huang Dianhao, *et al.* 2002. Collision Orogenic Process and Magmatic Metallogenic System in Zhongdian Arc [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 23 (1): 17~ 24 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Pusheng, Hou Zengqian, Li Lihui, *et al.* 2004a. Age of the Pulang porphyry Copper deposit in NW Yunnan and its geological significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 23 (11): 1 127~ 1 131 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Pusheng, Li Wenchang, Wang Haiping, *et al.* 2006. The Indosinian Pulang superlarge porphyry Copper deposit in Yunnan, China: Petrology and Chronology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (4): 989~ 1 000 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Pusheng, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, *et al.* 2003. Porphyries and porphyry copper deposits in Zhongdian Area, Northwest Yunnan [J]. *Mineral Deposits*, 22(4): 393~ 400 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Pusheng, Wang Haiping, Mo Xuanxue, *et al.* 2004b. Tectonic setting and prospects of porphyry copper deposits in Zhongdian island arc belt [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 25 (5): 535~ 540 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xingchun, Leng Chengbiao, Yang Chaozhi, *et al.* 2009. Chronology and Significance of Chundu Porphyry Copper Deposit in Northwest Yunnan, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (S): 359~ 360 (in Chinese).
- Zhao Zhenhua, Wang Qiang, Xiong Xiaolin, *et al.* 2007. Magnesian igneous rocks in northern Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (7): 1 696~ 1 707 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua, Wang Qiang, Xiong Xiaolin, *et al.* 2009. Magnesian andesites in north Xinjiang, China [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98: 1 325~ 1 340.
- 李金祥, 李光明, 秦克章, 等. 2008. 班公湖带多不杂富金斑岩铜矿床斑岩-火山岩的地球化学特征与时代: 对成矿构造背景的制约 [J]. *岩石学报*, 24 (3): 531~ 543.
- 李青. 2009. 普朗斑岩铜矿床斑岩特征及其成矿意义 [D]. 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 [J]. *地质学报*, 83 (10): 1 421~ 1 429.
- 李文昌, 曾普胜. 2007. 云南普朗超大型斑岩铜矿特征及成矿模型 [J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 34 (4): 436~ 446.
- 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 [J]. *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 [J]. *岩石学报*, 25 (01): 159~ 165.
- 曲晓明, 侯增谦, 唐绍华. 2003. 义敦岛弧带弧后区板内岩浆作用的年代及意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 22 (2): 131~ 137.
- 曲晓明, 江军华, 辛洪波, 等. 2010. 西藏冈底斯造山带几乎同时形成的两套埃达克岩为什么一套含矿一套不含矿? [J]. *矿床地质*, 29 (03): 381~ 394.
- 谭康华, 李光军, 黄定柱, 等. 2005. 普朗大型斑岩铜矿控矿条件 [J]. *云南地质*, 24 (2): 167~ 174.
- 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 [J]. *地球科学 (中国地质大学学报)*, 34 (1): 56~ 74.
- 王强, 唐功建, 贾小辉, 等. 2008. 埃达克岩的金属成矿作用 [J]. *高校地质学报*, 14 (3): 350~ 364.
- 王守旭, 张兴春, 冷成彪, 等. 2007a. 滇西北中甸普朗斑岩铜矿床地球化学与成矿机理初探 [J]. *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 [J]. *岩石学报*, 24 (10): 2 313~ 2 321.
- 王守旭, 张兴春, 秦朝建, 等. 2007b. 滇西北中甸普朗斑岩铜矿流体包裹体初步研究 [J]. *地球化学*, 36 (5): 467~ 478.
- 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 [J]. *地球学报*, 23 (1): 17~ 24.
- 曾普胜, 侯增谦, 李丽辉, 等. 2004a. 滇西北普朗斑岩铜矿床成矿时代及其意义 [J]. *地质通报*, 23 (11): 1 127~ 1 131.
- 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 [J]. *岩石学报*, (4): 989~ 1 000.
- 曾普胜, 莫宣学, 喻学惠, 等. 2003. 滇西北中甸斑岩及斑岩铜矿 [J]. *矿床地质*, 22 (4): 393~ 400.
- 曾普胜, 王海平, 莫宣学, 等. 2004b. 中甸岛弧带构造格架及斑岩铜矿前景 [J]. *地球学报*, 25 (005): 535~ 540.
- 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 [J]. *矿物学报*, (S): 359~ 360.
- 赵振华, 王强, 熊小林, 等. 2007. 新疆北部的富镁火成岩 [J]. *岩石学报*, 23 (7): 1 696~ 1 707.

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 [J]. *地质学报*, 83 (10): 1 430~ 1 435.
- 范玉华, 李文昌. 2006. 云南普朗斑岩铜矿床地质特征 [J]. *中国地质*, 33 (2): 352~ 362.
- 郭欣, 杜杨松, 庞振山, 等. 2009. 云南普朗斑岩铜矿蚀变带成矿流体特征及其成矿意义 [J]. *现代地质*, 23 (3): 465~ 471.
- 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 [J]. *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及成矿系统 [J]. *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 [J]. *大地构造与成矿学*, 32 (1): 124~ 130.