

中甸弧西斑岩带印支期中酸性侵入岩 成因与成矿意义

董毅 刘显凡 邓江红 李春辉 易立文 邹金沙 黄玉篷

(成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要:位于义敦岛弧带南端的中甸弧广泛发育印支期中-酸性浅成-超浅成复式杂岩及与之有关的斑(玢)岩型矿床;在其西斑岩带内,主要分布有阿热、春都、雪鸡坪和烂泥塘等 4 个斑(玢)岩体。阿热岩体的特征与埃达克岩相似; $\text{SiO}_2 > 58.06\%$, 平均 58.64% , 高 $\text{Al}_2\text{O}_3 (14.77\% \sim 17.29\%)$ 、 $\text{Sr} (490 \times 10^{-6} \sim 1409 \times 10^{-6})$ 、 $\text{Sr/Y} (37.44 \sim 83.79)$ 和 $\text{La/Yb} (4.62 \sim 31.48)$, 平均 28.51 值, 低 $\text{Y} (13.1 \times 10^{-6} \sim 16.82 \times 10^{-6})$ 和 $\text{Yb} (1.20 \sim 1.61)$ 值, δEu 为 $0.90 \sim 1.02$, REE 球粒陨石配分曲线呈平滑的右倾形态, 富集轻稀土, 严重亏损重稀土, 具较高的 $\text{MgO} (0.91\% \sim 3.77\%)$ 及 $\text{Mg}^\# (37.84 \sim 70.00)$ 值, 与其他含矿岩体特征基本一致。通过对主量和稀土及 Sr 元素研究对比表明, 研究区岩石可能由于俯冲的甘孜—理塘洋壳发生断离, 先后引发地幔楔及洋壳部分熔融, 初始熔浆与地壳发生不同混染叠加并随区域性收缩沿现今格咱断裂东侧短时间内多次脉动侵位形成具岛弧岩石向埃达克质岩石过渡特征的线性串珠状岩体, 其源区残留组合有石榴石+单斜辉石+角闪石, 初始熔浆上侵过程中受到地壳不同程度的混染叠加可能是导致该带成矿差异性的原因之一。

关键词:埃达克岩; 洋壳俯冲; 部分熔融; 中甸弧; 云南

中图分类号: P581

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2012)04-0887-13

三江构造-岩浆-成矿带中的义敦岛弧带经历了印支期的洋壳俯冲造山、燕山期的弧-陆碰撞和喜马拉雅期的陆内走滑作用^[1-7]。位于义敦岛弧南端的香格里拉(中甸)地区广泛发育印支期中-酸性浅成-超浅成复式杂岩及与之有关的斑(玢)岩型矿床, 并按照其空间分布特点、岩性特征、年代学和岩石地球化学特征分为东斑岩带、西斑岩带以及属都蛇绿岩混杂带 3 个构造-岩浆-成矿单元, 呈北西-南东向展布^[2,5-10]。西斑岩带印支期斑(玢)岩从南到北由阿热岩体、春都岩体、雪鸡坪岩体及烂泥塘岩体构成, 其中阿热岩体目前未见明显成矿。随着勘探和研究工作的深入, 该区已成为中国又一个重要的斑(玢)岩型铜矿床产地^[2,5-6,11]。已有研究表明^[1-16], 该区印支期斑(玢)岩在成岩时代上没有明显差异, 除阿热岩体形成于 228 Ma(另文详论), 其他成矿岩体基本集

中于 212~219 Ma^[10,14,17-19], 均属三叠纪晚期甘孜—理塘洋壳俯冲部分熔融的产物^[3,5,7,11], 具有壳幔岩浆混染叠加的特征^[5,17,20-21], 但在部分熔融后的岩浆演化机制上是否发生分离结晶作用存在不同的认识。本文在前人研究基础上, 主要通过岩体中主量元素和稀土元素及锶元素地球化学特征研究, 探讨岩体成矿差异的岩浆演化与成矿作用关系的地球化学动力学背景。

1 岩体背景及特征

中甸弧位于三江构造-岩浆-成矿带中义敦岛弧南端(图 1), 西邻中咱地块及格咱深大断裂, 其东边为甘孜—理塘结合带, 该带在北部呈北北西方向展布, 并在洛吉一带转为近东西方向, 格咱深大断裂南延至土官村一带与其相接^[3,6-9,16-17], 构成一个近南

收稿日期: 2011-12-21; 改回日期: 2012-03-27

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(212011120587)和矿物学岩石学矿床学四川省重点学科建设项目(SZD0407)联合资助。

作者简介: 董毅, 男, 1987 年生, 硕士生, 岩石地球化学专业; E-mail: Grapedy@hotmail.com。

北向的狭窄区域,李文昌等也将之称为格咱弧^[5],西斑岩带位于中甸弧(格咱弧)之中偏西处。该地区从 238 Ma 开始经历了印支期甘孜—理塘洋壳俯冲及岛弧岩浆侵位^[5],燕山期弧—陆碰撞及 S 型花岗岩的形成、喜马拉雅期逆冲—推覆构造和大规模走滑剪切活动以及拉分盆地的形成和花岗岩侵位,并在燕山期发生地壳缩短拆沉和地壳加厚作用^[5],由于印支期中甸弧因甘孜—理塘洋向西边的格咱地块俯冲(238~208Ma)时速度慢、角度缓,构造背景主要以压性为主^[5]。西斑岩带印支期中酸性岩侵位于一套沉积—火山岩建造中,主要为上三叠统曲嘎寺组(T_{3q})和上三叠统图姆沟组(T_{3t}),曲嘎寺组(T_{3q})岩性主要为砂岩、板岩及灰岩,图姆沟组(T_{3t})中主要为砂岩、板岩、灰岩及薄层状凝灰岩,与印支期岛弧有关的安山岩、玄武安山岩及英安岩在曲嘎寺组(T_{3q})及图姆沟组(T_{3t})中均有发育,邻近岩体的地层中发育大量角岩化砂岩及角岩,NW 向断裂及褶皱发育。

西斑岩带受格咱深大断裂控制,岩体总体呈 NNW 方向展布,被认为与该地区三叠纪晚期火山岩具有相同的岩浆来源^[7]。阿热岩体为石英二长斑岩及石英闪长玢岩构成的复式岩体,目前未见明显矿化;春都岩体为闪长玢岩和花岗闪长玢岩构成的复式岩体,具有一定规模矿化,经历了花岗闪长斑岩(形成于 $(217.2 \pm 2)\text{Ma}$)向闪长玢岩(形成于 $(212 \pm 3)\text{Ma}$)的侵位过程^[9],具逆向演化的特征,这可能与地壳混染有关;雪鸡坪岩体为闪长玢岩、石英闪长玢岩、石英二长斑岩及花岗岩构成的复式岩体,产出大型斑岩铜矿^[10];烂泥塘岩体主要为闪长玢岩及石英闪长玢岩和石英二长斑岩构成的复式岩体^[12],见有小规模矿化。

2 主量元素特征

表 1 列出了西斑岩带印支期中—酸性侵入岩主量元素数据。西斑岩带中阿热岩体 SiO_2 含量为 58.06%~60.76%(平均 58.64%),属中酸性岩,在 SiO_2 — K_2O 图解(图 2)中,主要落入橄榄玄粗岩系列区域,少数落入高钾系列; Al_2O_3 含量为 14.77%~17.29%(平均 15.53%), MgO 为 0.91%~3.77%,平均 2.73%, $\text{Mg}^\#$ 为 37.84~70.00,平均 49.71, A/CNK 为 0.672~1.396,属准铝—过铝质岩石,里特曼指数(σ)为 2.88~4.81,属于钙碱性系列。

春都、雪鸡坪及烂泥塘岩体 SiO_2 含量为 56.05%

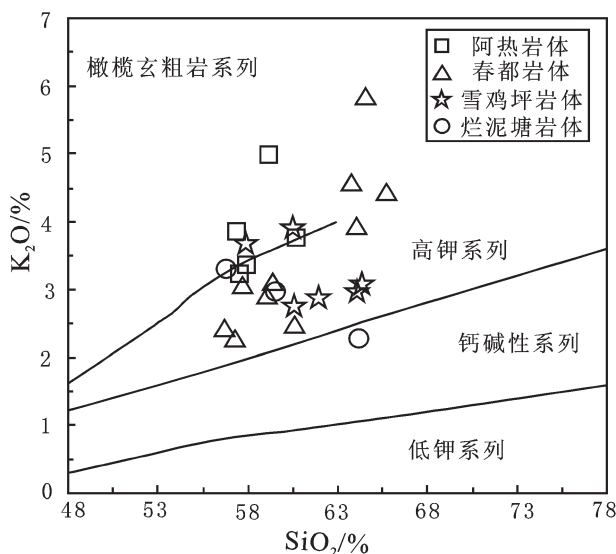


图 2 SiO_2 — K_2O 图解(底图据[22])

Fig.2 Diagram of SiO_2 versus K_2O (after [22])

~65.76%(平均 60.81%),较之阿热岩体含量偏高,在 SiO_2 — K_2O 图解中,春都岩体落入钙碱性系列及高钾系列中,雪鸡坪岩体主要落入高钾系列,少数落入橄榄粗玄岩系列区域,烂泥塘岩体落入高钾系列区域, Al_2O_3 含量为 11.72%~15.93%(平均 14.6%), A/CNK 为 0.77~1.59,属准铝—过铝质岩石,里特曼指数(σ)为 0.84~4.14,低于阿热岩体,属钙碱性系列, MgO 为 1.28%~5.13%(平均 2.91%), $\text{Mg}^\#$ 为 17.80~69.42(平均 50.88)。西斑岩带印支期中—酸性侵入岩具有高 Al、Na 的特征,里特曼指数表明,从未见矿岩体到成矿岩体,碱性增加,由高钾系列向橄榄粗玄岩系列变化。阿热岩体的 Al_2O_3 、 TiO_2 与 SiO_2 呈较弱的负相关,与 MgO 、 CaO 呈较弱的正相关,其他岩体与 Al_2O_3 、 TiO_2 、 MgO 、 CaO 呈较弱的负相关,与 Fe_2O_3 呈较弱的正相关,而与 Na_2O 、 K_2O 、 P_2O_5 相关性不明显,这可能由岩浆演化过程中岩浆的分离结晶不占主导作用及遭受到其他物质不同程度的叠加混染引起, $\text{Mg}^\#$ 特点表明了地幔物质混染叠加的存在。

3 稀土和 Sr 元素特征

3.1 稀土元素组成特征

西斑岩带印支期中酸性侵入岩稀土及 Sr 元素参数如表 2 所示。阿热岩体 $\sum \text{REE} = 159 \times 10^{-6} \sim 221.61 \times 10^{-6}$,平均 198.92×10^{-6} ;LREE 为 $135.01 \times 10^{-6} \sim 185.63 \times 10^{-6}$,HREE 为 $10.98 \times 10^{-6} \sim 14.16 \times 10^{-6}$;具有

表 1 西班牙带印支期中酸性侵入岩主要元素数据(%)和相关参数

Table 1 Compositions of major elements (%) of Indosinian intermediate-acidic intrusive rocks from the west porphyry belt

岩体名称	资料来源	样品名称	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	CO ₂	Σ	A/CNK	Mg#	σ	Na ₂ O/(K ₂ O
阿 热 岩 体	本 文 数 据	石英闪长玢岩	58.06	0.78	15.59	2.16	4.14	0.11	2.52	6.04	5.20	3.38	0.44	1.06	—	99.48	0.672	37.84	3.41	1.54
		石英二长玢岩	57.67	0.94	17.29	8.94	0.39	0.15	0.91	1.12	4.19	3.19	0.71	3.04	—	98.54	1.396	70.00	4.81	1.31
		石英二长玢岩	57.57	0.81	15.14	2.74	3.95	0.16	3.08	5.18	4.66	3.88	0.72	1.56	—	99.45	0.711	43.81	4.5	1.20
		石英二长玢岩	59.15	0.69	14.84	2.18	4.13	0.14	3.77	4.10	3.61	5.04	0.58	1.42	—	99.65	0.787	47.72	4.59	0.72
		石英二长玢岩	60.76	0.60	14.77	1.35	3.49	0.10	3.38	4.56	5.34	3.77	0.54	1.04	—	99.7	0.698	49.20	2.88	1.42
春 都 岩 体	[21]	闪长玢岩	59.39	1.15	15.7	2.67	2.55	0.04	3.16	2.38	4.02	3.12	0.39	2.25	2.03	99.56	1.097	55.34	3.31	1.29
		闪长玢岩	56.7	1.08	15.11	2.78	3.52	0.14	2.86	4.2	4.68	2.44	0.38	2.02	3.62	99.29	0.841	44.83	2.98	1.92
		闪长玢岩	56.05	1.23	15.65	2.42	4.67	0.04	4.18	2.68	5.38	1.23	0.5	2.74	2.22	99.34	1.04	47.23	4.14	4.37
		闪长玢岩	57.75	1.19	15.77	3.77	2.41	0.12	3.52	4.12	4.96	3.07	0.4	1.6	0.37	99.03	0.831	59.36	2.44	1.62
		闪长玢岩	60.62	1.11	13.24	3.63	1.69	0.06	3.44	2.62	4.34	2.48	0.39	1.39	2.42	98.07	0.908	67.06	2.65	1.75
		闪长玢岩	63.78	0.61	11.72	3	3.93	0.07	1.86	2.08	3.02	4.58	0.18	1.19	2.49	98.84	0.855	32.12	3.3	0.66
		闪长玢岩	64.6	0.57	11.95	1.56	5.91	0.04	1.28	1.19	2.73	5.87	0.08	0.97	1.53	99.19	0.919	17.80	1.96	0.47
[20]		闪长玢岩	57.28	1.03	14.36	3.46	3.21	0.04	3.76	4	3.33	2.29	0.24	—	—	—	0.943	53.95	1.65	1.45
		角闪石英二长岩(2)	64.04	1	14.09	3.9	2.25	0.06	1.26	2.03	2.1	3.93	0.28	—	—	—	1.236	35.90	2.19	0.53
[2]		石英闪长玢岩	59.12	1.72	15.48	7.86	2.09	0.05	2.2	2.87	3.13	2.94	0.36	1.14	1.9	100.86	1.142	51.28	1.62	1.06
		石英二长玢岩	65.76	1.12	13.69	6.36	1.05	0.01	1.33	0.53	1.73	4.45	0.3	2.02	1.74	100.09	1.587	55.88	0.84	0.39
[14]		石英闪长玢岩	61.92	0.6	15.11	4.01	1.99	0.22	4.82	4.31	1.17	2.89	0.36	2.09	—	99.49	1.172	70.78	1.2	0.40
		石英闪长玢岩	64.35	0.5	14.34	2.75	1.8	0.19	3.7	4.22	2.06	3.08	0.31	1.6	—	98.9	0.996	67.27	0.85	0.67
		石英闪长玢岩	60.57	0.64	14.78	3.71	2.26	0.26	5.13	5.62	1.17	2.77	0.36	1.8	—	99.07	0.976	69.42	1.18	0.42
		石英闪长玢岩	64.09	0.77	12.17	3.18	1.62	0.02	2.18	2.13	2.2	2.97	0.28	—	—	99.57	1.137	57.37	3.85	0.74
[2]		石英闪长玢岩	60.5	0.9	15.93	1.6	4.06	0.16	2.46	3.76	4.42	3.9	0.36	1.26	0.21	99.52	0.869	37.73	3.68	1.13
		弱蚀变闪长玢岩	57.96	1.28	15.18	2.23	4.83	0.14	3.49	5.1	3.86	3.68	0.44	1.7	0.33	100.22	0.774	41.95	2.41	1.05
[20]		闪长玢岩	59.56	1.24	15.33	2.46	4.33	0.1	2.88	5.06	3.46	2.97	0.3	—	—	99.64	0.847	39.94	2.2	1.16
		石英闪长玢岩(5)	64.18	0.75	15.26	3.84	0.9	0.02	1.98	2.26	4.68	2.27	0.34	—	—	96.48	1.07	68.75	1.65	2.06
[2]		弱蚀变闪长玢岩	61.88	1	15.51	5.38	1.8	0.1	2.42	3.49	4.89	0.79	0.31	2.02	0.16	99.75	1.017	57.35	3.22	6.19
		石英闪长玢岩	56.81	1.1	15.58	1.51	5.56	0.15	3.28	5.41	3.61	3.29	0.24	2.24	1.7	100.48	0.806	37.10	3.41	1.10

注:阿热岩体样品由四川冶金地质矿产测试中心通过 ICP-MS 及 ICP-OE 依据 DZ/G20-02 使用等离子体发射光谱法及质谱法测定;[2]为数据来源文献;
A/CNK=Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O),摩尔比;(2)为引文中样品件数;“—”为未列数据;σ=(Na₂O+K₂O)²/(SiO₂-43);Mg#=MgO/(MgO+FeO)。

表 2 西斑岩带印支期中酸性侵入岩 Sr 和稀土元素数据测试结果(10⁻⁶)
Table 2 REE and Sr data (10⁻⁶) of Indosinian intermediate-acidic intrusive rocks from the west porphyry belt

数据来源	样品名称	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Sr	ΣREE	ΣCe/ΣY	δEu	δCe	(La/Yb) _N
阿热塘岩体 本文数据	石英闪长斑岩	49.19	94.03	10.11	23.15	7.09	2.07	5.17	0.73	3.68	0.62	1.75	0.25	1.56	0.25	16.82	1409	216.47	13.25	1.00	0.98	22.58
	石英二长斑岩	47.09	106.0	9.72	22.56	6.93	2.01	5.28	0.71	3.64	0.62	1.78	0.26	1.61	0.25	13.15	511	221.61	13.72	0.98	1.15	20.94
	石英二长斑岩	45.67	103.4	9.75	22.72	7.26	2.15	5.19	0.71	3.65	0.61	1.70	0.25	1.51	0.24	16.69	1358	221.49	13.78	1.02	1.14	21.73
	石英二长斑岩	34.64	65.98	8.11	31.10	6.73	1.90	4.55	0.63	3.28	0.55	1.57	0.23	1.41	0.23	15.08	1165	175.98	11.94	0.99	0.93	17.66
	石英二长斑岩	32.45	60.18	7.29	27.84	5.74	1.50	4.12	0.57	2.87	0.49	1.33	0.20	1.20	0.19	13.10	490	159.08	12.30	0.90	0.92	19.34
	闪长斑岩	55.6	101	12	43	7.91	2.11	6.07	0.82	3.82	0.69	1.78	0.29	1.85	0.25	18.3	367	255.49	14.23	0.90	0.91	21.56
[21]	闪长斑岩	41.2	78	9.37	33.6	6.01	1.56	4.76	0.64	3	0.55	1.44	0.22	1.48	0.22	15.4	1400	197.45	13.79	0.86	0.94	19.97
	闪长斑岩	27.2	47.3	5.63	20.6	4.04	1.28	3.31	0.47	2.14	0.37	0.95	0.16	1.02	0.14	10.9	502	125.51	12.39	1.04	0.89	19.13
	闪长斑岩	53.4	94	11.2	40.4	7.16	1.86	5.71	0.76	3.54	0.64	1.64	0.26	1.72	0.24	18.4	1120	240.93	14.34	0.86	0.90	22.27
	闪长斑岩	50.2	90.89	10.12	37.55	5.97	1.23	5.65	0.64	2.48	0.42	1.34	0.21	2.4	0.25	9.35	588	218.70	14.63	0.64	0.93	15.00
	闪长斑岩	34.79	60.7	6.9	26.29	4.49	2.08	4.18	0.53	2.43	0.44	1.38	0.22	2.43	0.24	10.56	972.8	157.66	11.41	1.44	0.90	10.27
	二长斑岩	42.6	63.94	6.76	22.04	4.52	1.28	2.96	0.48	2.28	0.47	1.03	0.15	1.1	0.16	12.87	1390	162.64	16.35	1.00	0.83	27.78
[2]	黑云母二长斑岩	57.86	91	9.27	30.83	5.98	1.41	6	0.68	2.46	0.5	1.12	0.16	1.13	0.15	12.73		221.28	16.09	0.71	0.87	36.73
	闪长斑岩	54.92	86.19	9.11	33.73	6.78	1.77	5.47	0.71	3.17	0.61	1.4	0.21	1.38	0.19	16.07		221.71	14.65	0.86	0.86	28.55
[14]	石英闪长斑岩	27.99	53.22	6.03	21.76	3.64	0.82	2.74	0.4	1.98	0.37	0.94	0.14	0.85	0.14	10.08	424	131.10	15.01	0.76	0.96	23.62
[9]	石英闪长斑岩	35.6	73	9.03	26.2	4.99	1.42	3.75	0.67	2.71	0.54	1.41	0.25	1.3	0.2	13.5		174.57	13.87	0.96	0.97	19.64
[20]	二长花岗岩	37.1	62	7.73	21.9	4.09	1.09	2.86	0.54	2.16	0.43	1.13	0.22	1.09	0.16	12.2		154.70	15.59	0.92	0.85	24.41
	石英闪长斑岩	40.4	69	7.41	26.5	4.28	1.12	3.14	0.4	2.06	0.41	1.11	0.16	1.12	0.17	10.4	637	167.68	17.35	0.89	0.91	25.87
[16]	石英闪长斑岩	37.9	70.1	7.92	28.9	4.9	1.34	4.02	0.57	3.1	0.57	1.59	0.21	1.35	0.21	14	1180	176.68	13.00	0.90	0.94	20.14
	石英二长斑岩	38.9	64.4	7.38	24.8	4.49	1.16	2.68	0.38	2.06	0.36	1.05	0.16	1.13	0.17	7.7	832	156.82	17.66	0.94	0.87	24.69
	石英二长斑岩	68.3	97.2	10.4	33.7	5.58	1.43	3.98	0.57	2.69	0.42	1.17	0.16	1.05	0.15	8.6	517	235.40	21.26	0.88	0.80	46.66
	闪长斑岩	45.7	76.2	8.06	27.7	4.73	1.22	4	0.52	2.9	0.56	1.46	0.21	1.41	0.22	14.3		189.19	14.50	0.84	0.90	23.25
	闪长斑岩	40.6	66.9	7	24.4	4.01	1.18	3.48	0.47	2.52	0.47	1.29	0.18	1.19	0.18	12.9		166.77	14.73	0.94	0.89	24.47
	闪长斑岩	44.8	79.8	8.89	33.1	5.72	1.92	5.02	0.67	3.54	0.69	1.79	0.24	1.53	0.23	16.3		204.24	12.71	1.07	0.92	21.00
[2]	石英二长斑岩	50	75.97	7.55	26.03	5.17	1.3	3.74	0.61	2.44	0.51	1.13	0.17	1.2	0.18	12.85	506	188.85	16.64	0.86	0.85	29.89
	二长花岗岩	49.75	74.72	7.28	25.57	5.13	1.27	2.96	0.48	2.37	0.42	1.02	0.15	1.13	0.16	12.36	169	184.77	18.84	0.91	0.85	31.58
	黑云母闪长斑岩	58.57	85.92	10.98	33.25	9.31	1.88	5.95	0.85	3.24	0.68	1.81	0.26	1.41	0.22	17.71	1240	232.04	13.86	0.72	0.77	29.80
	闪长斑岩	69.97	108.7	11.17	37.97	7.45	1.75	5.23	0.76	0.39	0.64	1.56	0.26	1.55	0.28	17.23	1380	264.91	22.21	0.81	0.86	32.38
	黑云母闪长斑岩	40.58	76.49	8.09	29.7	4.61	1.11	3.42	0.44	2.58	0.51	1.27	0.21	1.24	0.19	13.5		183.94	16.29	0.82	0.97	23.47
	闪长斑岩	44.46	93.18	10.74	39.36	6.37	1.62	4.74	0.6	3.61	0.7	1.73	0.28	1.62	0.27	18.09		227.37	14.45	0.86	1.01	19.69
[2]	闪长斑岩	51.7	82.3	8.73	31.42	6.57	1.79	5.52	0.78	3.27	0.62	1.5	0.22	1.48	0.21	16.65	510	212.76	13.42	0.88	0.87	25.06

注:阿热塘岩体样品由四川冶金地质矿产测试中心通过 ICP-MS 及 ICP-OE 依据 DZG20-02 使用等离子体发射光谱法及质谱法测定;^[20]数据来源文献;^[21]球粒陨石标准值据文献[23]。

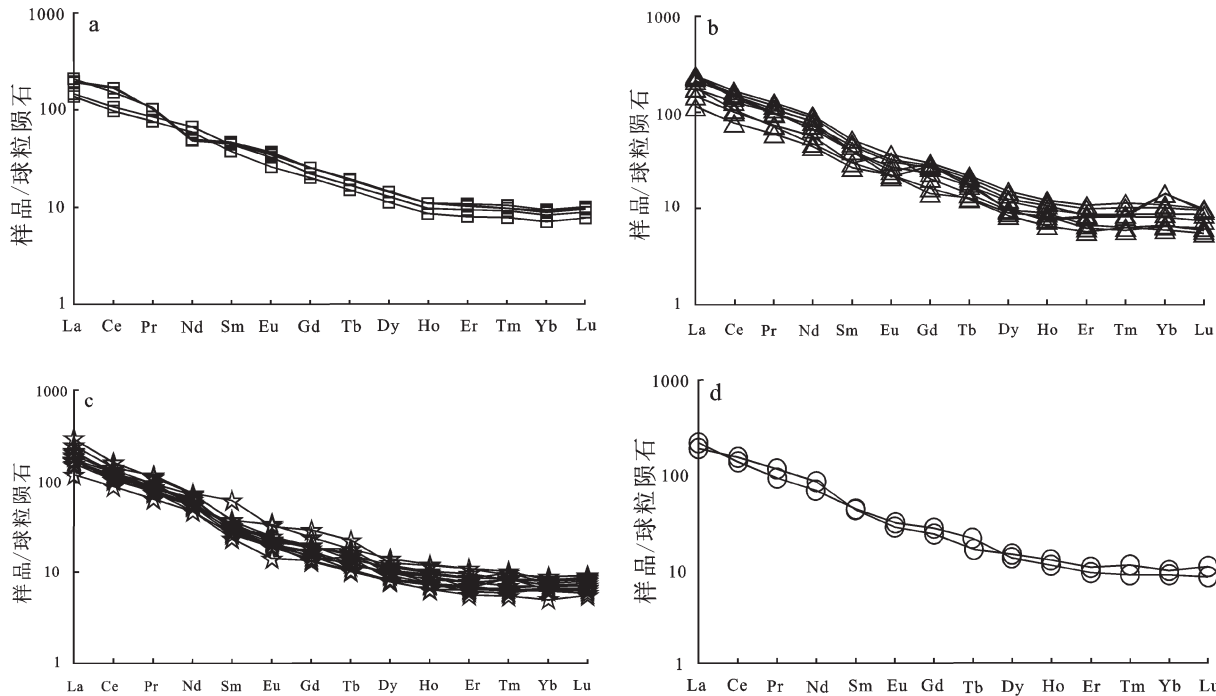


图 3 稀土配分曲线
a—阿热岩体;b—春都岩体;c—雪鸡坪岩体;d—烂泥塘岩体
Fig.3 Chondrite-normalized REE patterns
a— A're porphyry; b—Chundu porphyry; c—Xuejiping porphyry; d—Lannitang porphyry

较高的 La/Yb 值(4.62~31.48,平均 28.51), $\sum Ce/\sum Y$ 为 11.94~13.78,(La/Yb)_N 在 17.66~22.58,轻重稀土分馏明显,且亏损 Y ($13.1\times 10^{-6}\sim 16.82\times 10^{-6}$) 和 Yb ($1.20\times 10^{-6}\sim 1.61\times 10^{-6}$)。阿热岩体稀土配分曲线(图 3-a)呈平滑的右倾形态,与典型的埃达克岩石^[24]具有相似的稀土配分曲线,为轻稀土富集型,且明显亏损重稀土, δEu 为 0.90~1.02,平均为 0.98,仅呈现极弱的负异常或正异常,并不出现中酸性火成岩常出现的负铕异常; δCe 为 0.92~1.15,平均为 1.03,异常不明显。

春都、雪鸡坪及烂泥塘含矿岩体 $\sum REE=131.66\times 10^{-6}\sim 264.91\times 10^{-6}$,平均 194.35×10^{-6} ,LREE 为 $113.45\times 10^{-6}\sim 237.01\times 10^{-6}$,HREE 为 $7.56\times 10^{-6}\sim 15.57\times 10^{-6}$, $\sum Ce/\sum Y$ 为 11.41~22.21,(La/Yb)_N 为 15.00~46.65,La/Yb 为 14.32~65.05,平均 34.69,亏损 Y($7.7\times 10^{-6}\sim 18.4\times 10^{-6}$)及 Yb($1.1\times 10^{-6}\sim 2.43\times 10^{-6}$,平均为 1.25×10^{-6}), δEu 为 0.64~1.44,平均 0.90, δCe 为 0.77~1.01,平均 0.89,以弱负铈异常为主,其稀土配分曲线(图 3-b、c、d)亦呈平滑的右倾形态,为轻稀土富集型,重稀土亏损及分馏明显。与阿热岩体具

有基本一致的稀土元素特征,仅个别出现较明显的 Ce 和 Eu 的正异常及少量弱负铕异常。这些表明上述岩体可能来自相似的源区,其岩浆属同一体系演化并分支贯入形成。

3.2 Sr 元素及 SiO₂ 与稀土元素相关性特征

西斑岩带印支期中酸性侵入岩具有高 Sr 的特征,表 2 中给出的 24 组 Sr 元素值中仅 5 组小于 500。阿热岩体 Sr 含量范围为 $490\times 10^{-6}\sim 1409\times 10^{-6}$,平均为 987×10^{-6} ,春都、雪鸡坪及烂泥塘岩体 Sr 为 $121\times 10^{-6}\sim 1390\times 10^{-6}$,平均 740.1×10^{-6} ,它们都具有高 Sr/Y(30.63~108.05)及(La/Yb)_N(15.00~46.65)。Y-Sr/Y(图 4-a)及 Yb_N-(La/Yb)_N(图 4-b)图解显示西斑岩带样品中一部分落入埃达克岩区,一部分落入埃达克岩与典型岛弧岩石过渡区,少数落入经典岛弧岩石区域,呈现出典型岛弧岩石向埃达克岩过渡的特征,表明西斑岩带印支期中酸性侵入岩与埃达克岩具有一定的地球化学亲和性。

同一背景下产生的不同岩石在(Sm/Eu)样品-(Sm/Eu)样品/(Sm/Eu)球粒陨石图解中的投点均在一条斜线上,暗示这些岩石受同一构造岩浆系统控

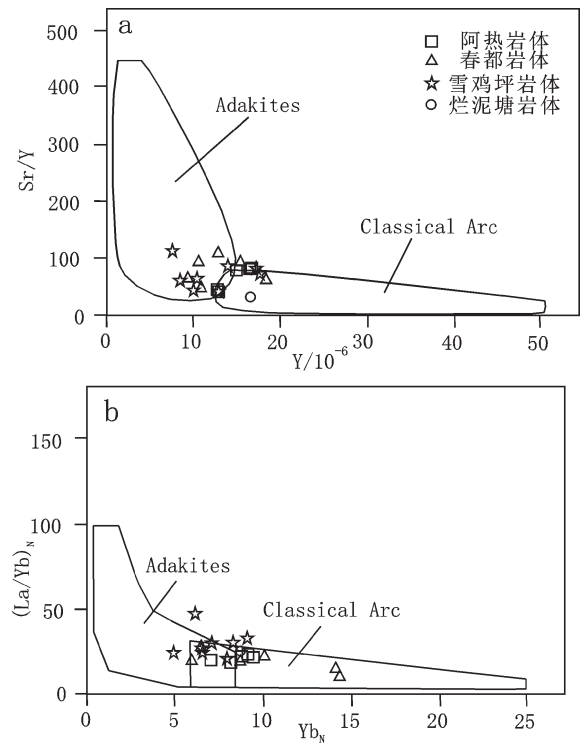


图 4 Y-Sr/Y(a)及 Yb_N-(La/Yb)_N(b)图解(图据文献[24])
Fig.4 Y-Sr/Y and Yb_N versus (La/Yb)_N diagram of intrusive rocks (after[24])

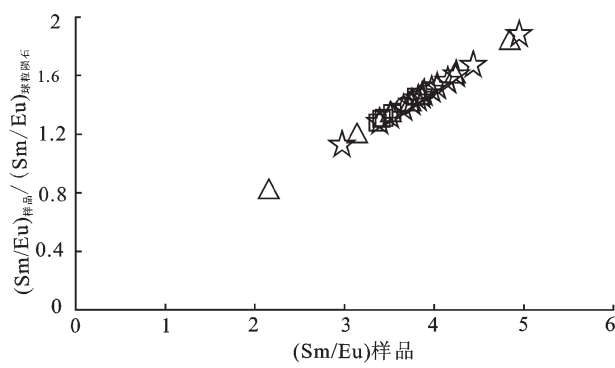


图 5 Sm/Eu-(Sm/Eu)样品/(Sm/Eu)球粒陨石图解(图例同图 4a)
Fig.5 Diagram of (Sm/Eu) sample versus. (Sm/Eu) sample/ (Sm/Eu) condrite (legends as for Fig. 4a)

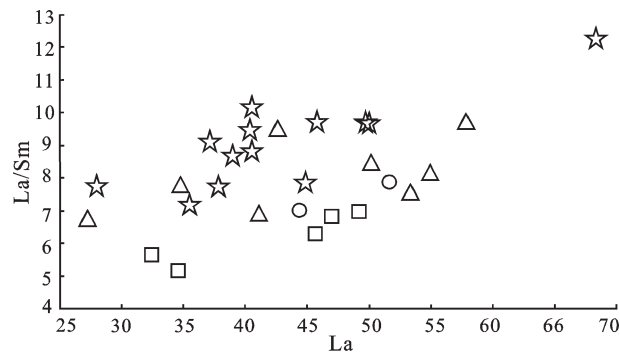


图 6 La-La/Sm 图解(图例同图 4a)
Fig.6 Diagram of La versus La/Sm (legends as for Fig. 4a)

制^[25]。图 5 中所有数据拟合呈一条斜线,表明西斑岩带印支期中酸性侵入岩可能受到同一地质构造岩浆系统的控制。在 La-La/Sm 图解(图 6)中,投点较分散,与分离结晶模型不符。 SiO_2 -(La/Yb)_N (图 7-a)中,(La/Yb)_N 不随 SiO_2 含量增加而增加,两者的相关性并不明显; SiO_2 - $\sum\text{Ce}/\sum\text{Y}$ 图解(图 7-b)图中,阿热岩体 $\sum\text{Ce}/\sum\text{Y}$ 随 SiO_2 含量增加而减少,含矿岩体随 SiO_2 含量增加而增加,含矿与不含矿岩体出现了明显的差异;在 SiO_2 - $\sum\text{REE}$ 图解(图 7-c)中,阿热岩体稀土总量与 SiO_2 含量的变化呈负相关,而对于含矿岩体两者的相关性则不明显,这些特征也与分异结晶作用不符,可能受部分熔融作用控制; δEu -(La/Yb)_N 图解(图 8)中,样品落入壳幔混染区,暗示岩浆演化过程中经历过壳幔混染叠加作用^[26-27],部分样品的(La/Yb)_N 及 $\sum\text{Ce}/\sum\text{Y}$ 随 SiO_2 增加突然变大或减小(图 7-a,b),暗示侵位过程中岩浆与地壳发生局部混染,形成成分不均匀的成岩岩浆,区内岩体中发现辉长岩捕虏体佐证了这一混源叠加的岩浆作用机制。

4 讨论

4.1 岩石成因及源区特征

自从 1990 年 Defant and Drummond^[24]提出埃达克岩(Adakite)概念以来,人们提出了多种模式用于解释具有埃达克岩地球化学特征的岩石:(1)与俯冲洋壳有关的部分熔融^[28-31];(2)拆沉下地壳^[32-34];(3)增厚下地壳熔融^[35-37];(4)玄武质岩浆的地壳混染与分离结晶过程(AFC)^[38-39];(5)长英质岩浆和玄武岩浆的混合^[40-42];(6)俯冲陆壳熔融^[43]。中甸弧西斑岩带印支期中酸性侵入岩总体具有高 $\text{Al}(\text{Al}_2\text{O}_3$ 平均为 14.75%)、Sr(平均为 791×10^{-6})、低 Y(平均为 13.80×10^{-6})、轻稀土富集、钬异常不明显等特点,与 Defant and Drummond^[24]所提出埃达克岩的判断标准类似,结合图解(4-a,b),表明本文研究的系列岩体属于与埃达克岩有成因联系的安山岩系列(Adakite-linked andesites,简称 ALA)^[44]。

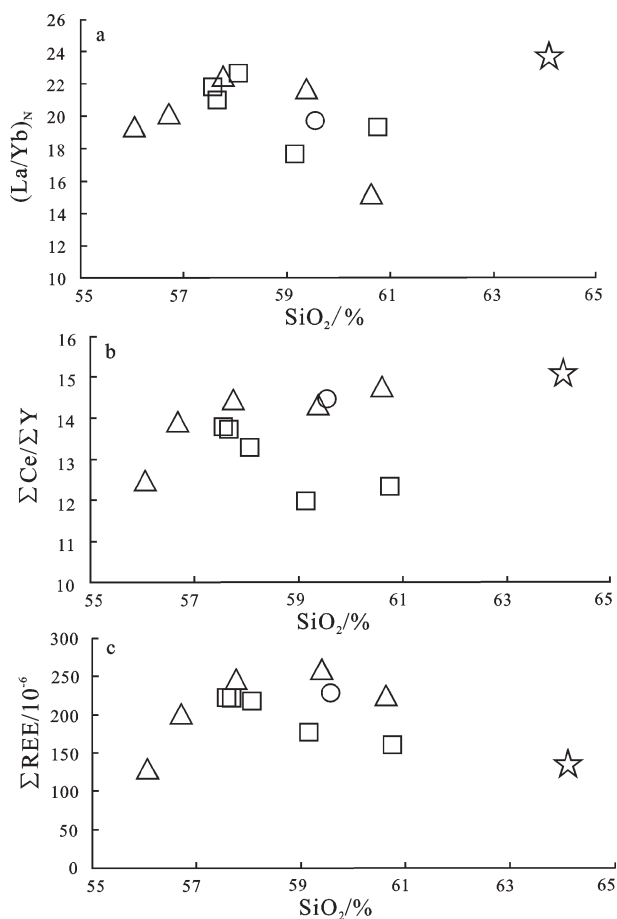


图 7 SiO_2 -(La/Yb)_N(a)、 $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ - SiO_2 (b)及
 SiO_2 - ΣREE (c)图解(图例同图 4)

Fig.7 Diagram of SiO_2 -(La/Yb)_N(a), $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ - SiO_2 (b)
and SiO_2 versus ΣREE (c) (legends as for Fig. 4)

Macpherson et al.^[45]认为菲律宾 Surigao 岛的更新世埃达克岩由岛弧岩浆经历石榴子石的高压分离结晶形成;Castillo et al.^[38] 认为菲律宾 Camiguin 岛上的埃达克岩是玄武质岩浆同化混染低压条件下的角闪石±斜长石的分离结晶产物。但本文依据稀土元素相关性特征研究认为,西班牙带印支期中酸性岩的分离结晶作用并不明显,而以部分熔融为主,表明这些岩体不是由玄武质岩浆的地壳混染与分离结晶过程(AFC)形成。该区岩石在甘孜—理塘洋壳俯冲的背景下形成,因而该区系列岩石不会是由加厚的地壳、拆沉地壳及俯冲的陆壳熔融形成。长英质岩浆和玄武岩浆的混合形成的岩石 MgO 通常大于 4%, $\text{Mg}^\#$ 高于 65.5^[40],这与研究区内岩石的特点差异较大。

研究表明,俯冲洋壳成因的埃达克岩通常与岛弧及 SSZ(supra-subduction zone)型蛇绿岩共生^[46],西

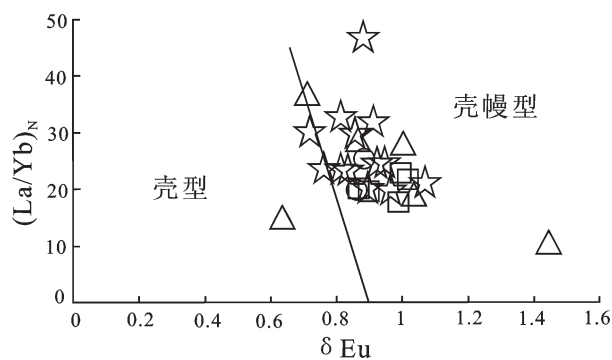


图 8 δEu -(La/Yb)_N 图解(底图据文献[29-30],图例同图 4)
Fig.8 Diagram of δEu versus (La/Y)_N (after [29-30], legends
as for Fig. 4)

斑岩带印支期中酸性侵入岩中存在典型的岛弧岩石,且在其东边分布 SSZ 型蛇绿岩带^[4-6],因此这些具埃达克岩特征的中酸性侵入岩应是洋壳俯冲的产物。

研究区内岩浆演化机制主要为部分熔融,所以通过其微量元素特征可以较好地指示源区性质^[47]。石榴石强烈富集 HREE,而角闪石相对富集中稀土;当石榴石为主要残留相时,熔体表现为 HREE 的强烈亏损,此时 Y/Yb 大于 10,西班牙带印支期中酸性侵入岩的 HREE 和 Y 亏损强烈,表明源区残留相中有石榴石的存在;当角闪石为主要的残留相时,熔体表现为 HREE 相对平坦,Y/Yb 的值在 10 左右^[48-49],西班牙带印支期中酸性侵入岩的 Y/Yb 平均为 9.64,大部分小于 10,REE 配分曲线相对较平坦,暗示其源区中残留有石榴石和角闪石。单斜辉石中 Sr 的含量显著低于斜长石中 Sr 的含量^[50],区内侵入岩 Sr 及 Sr/Y 显示出较高的值,表明源区同时残留单斜辉石。续海金等^[51]通过实验岩石学研究认为,在一定温度压力条件下,俯冲洋壳熔融可以形成埃达克熔体,残余组合为石榴石+单斜辉石+角闪石,与前述分析吻合。

甘孜—理塘洋壳俯冲时限为 237~206 Ma^[3],这一冷的、老的洋壳在俯冲过程中自身并不发生熔融,仅在地幔传热及摩擦剪切作用下发生脱水作用^[52],形成的流体富集大离子亲石元素,并与上覆地幔楔发生交代作用。但由于西班牙带西侧的羌塘地块于中三叠时期(约 230 Ma)向东挤压碰撞中甸弧,俯冲中的甘孜—理塘洋壳发生断离^[53],使洋壳下覆软流圈流体及热量涌入并导致经流体交代的地幔楔发生部分熔融^[54],形成典型岛弧岩浆;随着断离缺口增

大,后期大量热量涌入,导致洋壳板片发生部分熔融,随后与地幔楔物质混染,形成具埃达克岩地球化学特征的岩浆,并在 228~212 Ma 期间形成来源相似的多期次初熔岩浆,并不同程度混染地壳物质,随区域性收缩沿现今格咱深大断裂东侧短时间内多次上侵就位,形成具岛弧岩石向埃达克质岩石过渡特征的线性串珠状岩体。

4.2 成矿意义

大量研究表明,大型-超大型斑岩型 Cu-Au 矿床通常产自岩浆弧环境且与岩浆中硫的饱和度关系密切^[55],与俯冲板片熔体具有高氧逸度(f_{O_2})特征^[56-58]有关,而洋壳中 Cu 的丰度是地幔或地壳中的 2~3 倍^[59],当具有较高的氧逸度(f_{O_2})的熔体存在时,硫化物将转变为硫酸盐,有利于洋壳中 Cu、Au 等元素在岩浆中富集^[60],并在上侵过程中与地壳物质混染,有利于进一步萃取成矿元素进入熔体中,从而形成富集 Cu、Au 等成矿元素的岛弧型岩浆。当熔体快速上升到地壳浅部时由于温度、压力及氧逸度的降低,又可能导致 Cu、Au 等成矿物质从熔体中释放成矿^[61-62]。成矿斑岩体往往比不成矿斑岩体的氧逸度要高,且相应岩体的剥蚀深度增大。辛洪波等^[63]通过研究西藏冈底斯斑岩铜矿带含矿岩体锆石中的 Ce 元素表明岩浆侵位过程中与上地壳物质混染程度的不同会导致氧逸度(f_{O_2})的变化,混染程度增加会使岩浆中氧逸度增加,而岩浆中的 Cu、Au 等成矿元素会偏向于氧逸度较高的熔体。岩浆运移过程中氧逸度的变化可能较大,而雪鸡坪等含矿岩体的岩浆在上侵过程中具有极高的氧逸度^[10],这种差异可能是岩浆中成矿元素富集程度差异并导致成矿差异的原因之一。该带上斑岩型矿床含矿岩体来源于甘孜—理塘洋壳板片的俯冲引起的部分熔融岩浆,含矿物质随岩浆运移并在一定的温度、压力及氧逸度条件下成矿物质从岩浆中释放成矿,从而形成该带中的斑岩型矿床。阿热岩体与其他含矿岩体的相似性,暗示其可能随剥蚀或揭露深度加大而显示成矿。

5 结 论

(1)西斑岩带内阿热斑岩体与其他含矿岩体特征相似,受同一岩浆构造系统控制,具有较高的 Mg、Al、Sr,低 Y、Yb,轻稀土富集,严重亏损重稀土,铈异常不明显等特点,显示出典型岛弧岩石向埃达克岩过渡的特征。

(2)该区岩石的形成可能由于甘孜—理塘洋壳发生断离,前期流体及热量引发地幔楔部分熔融形成具岛弧岩石特征的初熔岩浆;后期大量热量涌入,导致洋壳板片发生部分熔融,并与地幔楔混染,形成具埃达克岩地球化学特征的岩浆,它们在上侵过程中与地壳发生不同程度混染,并随区域性收缩沿现今格咱断裂东侧短时间内多次脉动侵位形成具岛弧岩石向埃达克质岩石过渡特征的线性串珠状岩体,其源区可能残留有石榴石、单斜辉石及角闪石。该带中的斑岩型矿床与甘孜—理塘洋壳板片的俯冲引起的部分熔融岩浆有关。

(3)西斑岩带中印支期中酸性侵入岩中的阿热岩体与其他含矿岩体的相似性,暗示其可能随剥蚀或揭露深度加大而显示成矿,尤其是初始岩浆与地壳发生不同程度的物质混染叠加,既有利于成矿,也可能是导致不同岩体成矿差异性的原因之一。

致谢:野外工作得到了成都理工大学地球科学学院刘援朝教授和龙训荣副教授的指导以及李凌杰等同学的帮助,审稿专家的意见让作者受益匪浅,在此一并表示衷心感谢!

参考文献(References):

- [1] 侯增谦,侯立纬,叶庆同,等.三江地区义敦岛弧构造-岩浆演化与火山成因块状硫化物矿床[M].北京:地震出版社,1995.
Hou Zengqian, Hou Liwei, Ye Qingtong, et al. Tectono-magmatic Evolution of the Yidun Island-Arc and Volcanogenic Massive Sulfide Deposits in the Sanjiang Region, S.W.China [M]. Beijing: Seismological Press,1995(in Chinese with English abstract).
- [2] 侯增谦,杨岳清,王海平,等.三江义敦岛弧碰撞造山过程与成矿系统[M].北京:地质出版社,2003:156-160.
Hou Zengqian, Yang Yueqing, Wang Haiping, et al. Collision-Orogenic and Mineralization Systems of the Yidun Arc Orogen in Sanjiang Region, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003:156-160(in Chinese with English abstract).
- [3] 侯增谦,杨岳清,曲晓明,等.三江地区义敦岛弧造山带演化和成矿系统[J].地质学报,2004,78(1):109-118.
Hou Zengqian, Yang Yueqing, Qu Xiaoming, et al. Tectonic evolution and mineralization systems of the Yidun arc orogen in Sanjiang region, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(1):109-118(in Chinese with English abstract).
- [4] 李文昌,伊光候,卢映祥,等.西南“三江”格咱火山-岩浆弧中红山-属都蛇绿混杂岩带的厘定及其意义[J].岩石学报,2010,26(6):1662-1664.
Li Wencang, Yin Guanghou, Lu Yingxiang, et al. Delineation of Hongshan-Shudu ophiolite mélange in Geza volcanic-magmatic arc and its significance, southwest “Jinsha-Lancang-Nu rivers”[J]. Acta

- Petrologica Sinica, 2010, 26(6):1662–1664(in Chinese with English abstract).
- [5] 李文昌, 伊光候, 余海军, 等. 滇西北格咱火山–岩浆弧斑岩成矿作用[J]. 岩石学报, 2011, 27(9):2544–2550.
- Li Wenchang, Yin Guanghou, Yu Haijun, et al. The porphyry metallogensis of Geza volcanic magmatic arc in NW Yunnan [J]. Acta Petrologica Sinica, 27(9):2544–2550(in Chinese with English abstract).
- [6] 曾普胜, 王海平, 莫宣学, 等. 中甸岛弧带构造格架及斑岩铜矿前景[J]. 地球学报, 2004, 25(5):535–540.
- Zeng Pusheng, Wang Haiping, Mo Xuanxue, et al. Tectonic setting and prospects of porphyry copper deposits in Zhongdian island arc belt [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2004, 25 (5):535–540 (in Chinese with English abstract).
- [7] 杨岳清, 侯增谦, 黄典豪, 等. 中甸弧碰撞造山作用与岩浆成矿系统[J]. 地球学报, 2002, 23(1):17–24.
- Yang Yueqing, Hou Zengqian, Huang Dianhao, et al. Collision orogenic process and magmatic metallogenic system in Zhongdian Arc[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23(1):17–24(in Chinese with English abstract).
- [8] 曾普胜, 莫宣学, 喻学惠, 等. 滇西北中甸斑岩及斑岩铜矿 [J]. 矿床地质, 2003, 20(4):393–400.
- Zeng Pusheng, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, et al. Porphyries and porphyry copper deposits in Zhongdian area, northwestern Yunnan [J]. Mineral Deposits, 2003, 20(4):393–400(in Chinese with English abstract).
- [9] 曾普胜, 莫宣学, 喻学惠, 等. 滇西北中甸地区中酸性斑岩及其含矿性初步研究[J]. 地球学报, 1999, 20(增刊):359–336.
- Zeng Pusheng, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, et al. Preliminary research on the intermediate–acidic porphyries and their ore–bearing in Zhongdian area, northwest Yunnan [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1999, 20(Supp.):359–336(in Chinese with English abstract).
- [10] 任江波, 许继锋, 陈建林. 中甸岛弧成矿斑岩的锆石年代学及其意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(9):2592–2598.
- Ren Jiangbo, Xu Jifeng, Chen Jianlin. Zircon geochronology and geological implications of ore–bearing porphyries from Zhongdian arc[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(9):2592–2598(in Chinese with English abstract).
- [11] 冷成彪, 张兴春, 王守旭, 等. 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[J]. 矿物学报, 2007, 27(3/4):416–419.
- Leng Chengbiao, Zhang Xingchun, Wang Shouxu, et al. Geochemical characteristics of porphyry copper deposits in the Zhongdian area, Yunnan as exemplified by the Xuejiping and Pulang porphyry copper deposits[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2007, 27(3/4):416–419(in Chinese with English abstract).
- [12] 苟体忠, 钟宏, 冷成彪, 等. 云南中甸地区烂泥塘低温热液型 Cu–Au 矿床铂族元素(PGE)地球化学特征[J]. 矿物学报, 2010, 30(3):319–320.
- Gou Tizhong, Zhong Hong, Leng Chengbiao, et al. Geochemistry of platinum–group elements of the Lannitang epithermal Cu–Au deposit in the Zhongdian region, Yunnan Province, SW China [J]. 2010, 30(3):319–320(in Chinese with English abstract).
- [13] 侯增谦. 三江地区义敦岛弧构造–岩浆演化特征 [C]//地质矿产部. 青藏高原地质文集. 北京:地质出版社, 1991, 21:153–165.
- Hou Zengqian. Characteristics of tectono–magmatic evolution of Yidun island arc in Sanjiang region [C]//Ministry of Geology and Mineral Resources of China. Geological Collected Works of Qinghai–Tibet Plateau. Beijing:Geological Publishing House, 1991, 21:153–165(in Chinese with English abstract).
- [14] 林清茶, 夏斌, 张玉泉. 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, 2006, 25(1/2):133–135.
- Lin Qingcha, Xia Bin, Zhang Yuquan. Zircon SHRIMP U–Pb dating of the syn–collosional Xuejiping quartz diorite porphyrite in Zhongdian, Yunnan, China, and its geological implications [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(1/2):133–135(in Chinese with English abstract).
- [15] 李文昌, 刘学龙, 曾普胜, 等. 云南普朗斑岩型铜矿成矿岩体的基本特征[J]. 中国地质, 2011, 38(2):403–412.
- Li Wenchang, Liu Xuelong, Zeng Pusheng, et al. The characteristics of metallogenic rocks in the Pulang porphyry copper deposit of Yunnan Province [J]. Geology in China, 2011, 38(2):403–412(in Chinese with English abstract).
- [16] 冷成彪. 滇西北雪鸡坪斑岩铜矿地质背景及矿床地球化学特征研究 [D]. 博士学位论文. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2007:78.
- Leng Chengbiao. Ore deposit geochemistry and regional geological setting of the Xuejiping porphyry copper deposit, Northwest Yunnan, China[D]. Dissertation for the degree of Doctor. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2007:78 (in Chinese with English abstract).
- [17] 曹殿华, 王安建, 黄玉凤, 等. 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, 2009, 83(10):1430–1434.
- Cao Dianhua, Wang Anjian, Huang Yufeng, et al. SHRIMP geochronology and Hf isotope composition of zircons from Xuejiping porphyry copper deposit, Yunnan Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83 (10):1430–1434 (in Chinese with English abstract).
- [18] 张兴春, 冷成彪, 杨朝志, 等. 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, 2009, S1:359–360.
- Zhang Xingchun, Leng Chengbiao, Yang Chaozhi, et al. Zircon SHRIMP U–Pb dating and geological significance of the porphyries in Chundu porphyry copper deposit in Zhongdian, northwest Yunnan, China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009, S1:359–360(in Chinese with English abstract).
- [19] 杨帆, 邹国富, 吴静, 等. 中甸春都铜矿区岩体成岩时代及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(2):307–313.

- Yang Fan, Zou Guofu, Wu Jing, et al. Ages and geological significance of the porphyries in the Chundu copper mining area in Zhongdian, Yunnan Province [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2011, 35(2):307–313(in Chinese with English abstract).
- [20] 吕伯西, 王增, 张能德, 等. 三江地区花岗岩类及其成矿专属性 [M]. 北京:地质出版社, 1993:32–47.
- Lv Boxi, Wang Zeng, Zhang Nengde, et al. Granites in the Sanjiang area and Metallogenic Specialization, Southwestern China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993:32–47(in Chinese with English abstract).
- [21] 吴静, 李峰, 姜永果, 等. 云南香格里拉春都斑岩体岩石地球化学特征研究[J]. *矿物学报*, 2011, 31(3):552–558.
- Wu Jing, Li Feng, Jiang Yongguo, et al. A Study on Petrological Geochemistry Features of Chundu Porphyry Body, Xianggelila, Yunnan Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2011, 31(3): 552–558(in Chinese with English abstract).
- [22] Morrison G W. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association[J]. *Lithos*, 1980, 13:97–108.
- [23] Sun S S, McDonough W E. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts:Implications for mantle composition and processes. In:Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmaism in the Ocean Basins* [J]. Geological Society Special Publication, 1989, 42:313–345.
- [24] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 347:662–665.
- [25] 王建国, 刘洪臣, 邓军, 等. 胶东谢家沟金矿稀土元素特征及其成矿意义[J]. *地质学报*, 2009, 83(10):1502.
- Wang Jianguo, Liu Hongchen, Deng Jun, et al. REE characteristics of the Xiejiagou gold deposit, eastern Shandong Province and its significance to mineralizations [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83 (10):1502(in Chinese with English abstract).
- [26] 张芳荣, 沈渭洲, 舒良树, 等. 江西省早古生代晚期花岗岩的地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2010, 26(12):3464.
- Zhang Rongfang, Shen Weizhou, Su Liangshu, et al. Geochemical features of granites formed at late stage of Early Paleozoic in Jiangxi Province and their geological significances [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(12):3464(in Chinese with English abstract).
- [27] 陈佑纬, 毕献武, 胡瑞忠, 等. 贵东复式岩体印支期产铀和非产铀花岗岩地球化学特征对比研究 [J]. *矿物岩石*, 2009, 29(3): 2009.
- Chen Youwei, Bi Xianwu, Hu Ruizhong, et al. Comparison of geochemical characreristic of Uranium and Non-uranium-bearing Indosinian Granites in guidong composition pluton [J].*Journal of Mineralogy and Petrology*, 2009, 29 (3):2009 (in Chinese with English abstract).
- [28] Li W X, Li X H. Adakitic granites within the NE Jiangxi ophiolites, South China:Geochemical and Nd isotopic evidence [J]. *Precamb. Res.*, 2003, 122(1/4):29–44.
- [29] Zhou M F, Yan D P, Wang C L, et al. Subduction-related origin of the 750 Ma Xuelongbao adakitic complex (Sichuan Province, China):Implications for the tectonic setting of the giant Neoproterozoic magmatic event in South China [J].*Earth Planet Sci. Lett.*, 2006, 248(1/2):286–300.
- [30] Wang Q, Wyman D A, Zhao Z H, et al. Petrogenesis of Carboniferous adakites and Nb-enriched arc basalts in the Alataw area, northern Tianshan Range (western China):Implications for Phanerozoic crustal growth in the Central Asia Orogenic Belt [J]. *Chem. Geol.*, 2007, 236(1/2):42–64.
- [31] Wang Q, Wyman D A, Xu J F, et al. Triassic Nb-enriched basalts, magnesian andesites, and adakites of the Qiangtang terrane (Central Tibet):Evidence for metasomatism by slab-derived melts in the mantle wedge [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2008, 155 (4):473–490.
- [32] Hou M L, Jang Y H, Jiang S Y, et al. Contrasting origins of late Mesozoic adakitic granitoids from the northwestern Jiaodong Peninsula, east China:Implications for crustal thickening to delamination [J]. *Geol. Mag.*, 2007, 144(4):619–631.
- [33] Wang Q, Xu J F, Jian P, et al. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic stting, Dexing, South China:Implications for the genesis of porphyry copper mineralization [J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(1):119–144.
- [34] Xu W L, Gao S, Wang Q H, et al. Mesozoic crustal thickening of the eastern North China craton:Evidence from eclogite xenoliths and petrologic implications[J]. *Geology*, 2006, 34(9):721–724.
- [35] Chung S L, Liu D Y, Ji J Q, et al. Adakites from continental collision zones:Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet [J]. *Geology*, 2003, 31(11):1021–1024.
- [36] Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, et al. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 2004, 220(1/2):139–155.
- [37] Zhao Z H, Xiong X L, Wang Q, et al. Underplating-related adakites in Xinjiang Tianshan,China [J]. *Lithos*, 2008, 102(1/2): 374–391.
- [38] Castillo P R, Janney P E, Solidum R U. Petrology and geochemistry of Camiguin island, southern Philippines:Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrogy*, 1999, 134:33–51.
- [39] Castillo P R. An overview of adakite petrogenesis [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(3):257–268.
- [40] Guo F, Nakamura E, Fan W M, et al. Generation of Palaeocene adakitic andesites by magma mixing; Yanji Area, NE China [J]. *J. Petrol.*, 2007, 48(4):661–692.
- [41] Streck M J, Leeman W P. High-magnesian andesite from Mount Shasta:A product of magma mixing and contamination, not a primitive mantle melt [J]. *Chesley J. Geology*, 2007, 35(4):351–354.
- [42] Qin J F, Lai S C, Wang J, et al. High-Mg[#] adakitic tonalite from the Xichahe area,south Qinling Orogenic Belt (Central China): Petrogenesis and geological implications [J]. *Int. Geol. Rev.*, 2007, 49(12):1145–1158.

- [43] Xu W C, Zhao H F, Guo L, et al. Miocene high Sr/Y magmatism, south Tibet: Product of partial melting of subducted Indian continental crust and its tectonic implication [J]. *Lithos*, 2009, 114(3/4):293–306.
- [44] Sajona F G, Maury R C. Association of adakites with gold and copper mineralization in Philippines [J]. *C. R. Acad Sci. Paris Earth Planet Sci.*, 1998, 326(1):27–34.
- [45] Macpherson C G, Dreher S T, Thirlwall M F. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 2006, 243(3/4):581–593.
- [46] 韦栋梁, 夏斌, 周国庆, 等. 西藏泽当英云闪长岩的地球化学和 Sr–Nd 同位素特征: 特提斯洋内俯冲的新证据 [J]. *中国科学(D 辑)*, 2007, 37(4):447–448.
Wei Dongliang, Xia Bin, Zhou Guoqing, et al. Geochemistry and Sr–Nd isotope characteristics of tonalites in Zedang, Tibet: New evidence for intra-Tethyan subduction [J]. *Science in China (Series D)*, 2007, 50(6):836–846.
- [47] Green T H. Experimental studies of trace-element partitioning applicable to igneous petrogenesis 16 years later [J]. *Chemical Geology*, 1994, 117(1–36).
- [48] 吴福元, 葛文春, 孙德有. 埃达克质岩的概念, 识别标志及其地质意义 [C]//肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 花岗岩研究思维与方法. 北京:地质出版社, 2002:172–191.
Wu Fuyuan, Ge Wenchun, Sun Deyou. The definition, diacrimination of adakites and their geological role [C]//Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, et al. *The Ways of Investigation on Granitoids*. Beijing: Geological Publishing House, 2002:172–191 (in Chinese with English abstract).
- [49] 秦江峰, 赖绍聪, 李永飞. 扬子板块北缘碧口地区阳坝花岗闪长岩体成因研究及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2005, 21(3):698–707.
Qin Jiangfeng, Lai Shaocong, Li Yongfei. Petrogenesis and geological significance of Yangba granodiorites from Bikou area, northern margin of Yangtze Plate [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3):698–707 (in Chinese with English abstract).
- [50] 杨进辉, 朱美妃, 刘伟, 等. 胶东地区郭家岭花岗闪长岩的地球化学特征及成因 [J]. *岩石学报*, 2003, 19(4):692–700.
Yang Jinhui, Zhu Meifei, Liu Wei, et al. Geochemistry and petrogenesis of Guojialing granodiorites from the northwestern Jiaodong Peninsula, eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(4):692–700 (in Chinese with English abstract).
- [51] 续海金, 马昌前. 实验岩石学对埃达克岩成因的限定——兼论中国东部富钾高 Sr/Y 比值花岗岩类 [J]. *地学前缘*, 2003, 10(4):417–427.
Xu Haijin, Ma Changqian. Constraints of experimental petrology on the origin of adakites, and petrogenesis of Mesozoic K-rich and high Sr/Y ratio granitoids in eastern China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(4):417–427 (in Chinese with English abstract).
- [52] 石耀霖, 张健. 中国东北远离海沟陆内弧后扩张形成新生代火山的深部地球动力学背景 [J]. *地震学报*, 2004, 26(增刊):2.
Shi Yaolin, Zhang Jian. Deep geodynamics of far field intercontinental back-arc extension formation of cenozoic volcanoes in northeastern China [J]. *Acta seismologica Sinica*, 2004, 26(Supp.):2 (in Chinese with English abstract).
- [53] Yuan Chao, Zhou Meifu, Sun Min, et al. Triassic granitoids in the eastern Songpan Ganzi Fold Belt, SW China: Magmatic response to geodynamics of the deep lithosphere [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, 134:33–51.
- [54] 陈建林, 许继锋, 任江波, 等. 俯冲型和碰撞型含矿斑岩地球化学组成的差异 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(9):2738–2740.
Chen Jianlin, Xu Jifeng, Ren Jiangbo, et al. Geochemical differences between the subduction and collisional type ore-bearing porphyric rocks [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27 (9):2738–2740 (in Chinese with English abstract).
- [55] Wyborn D, Sun S S. Sulphur-undersaturated magmatism: A key factor for generating magma-related copper-gold deposits [J]. *AGSO Research Newsletter*, 1994, 21:7–8.
- [56] Mungall J E. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits [J]. *Geology*, 2002, 30:915–918.
- [57] 王强, 赵振华, 许继锋, 等. 天山北部石炭纪埃达克岩-高镁安山岩-富 Nb 岛弧玄武质岩: 中亚造山带显生宙地壳生长与铜金成矿意义 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(1):11–30.
Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xu Jifeng, et al. Carboniferous adakite-high-Mg andesite-Nb enriched basaltic rock suites in the Northern Tianshan area: Implications for Phanerozoic crustal growth in the Central Asia Orogenic Belt and Cu–Au mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22 (1):11–30 (in Chinese with English abstract).
- [58] Liang H Y, Sun W D, Su W C, et al. Porphyry copper-gold mineralization at Yulong, China, Promoted by decreasing redox potential during magnetite alteration [J]. *Economic Geology*, 2009, 104:587–596.
- [59] 孙卫东, 凌明星, 杨晓勇, 等. 洋脊俯冲与斑岩铜金矿成矿 [J]. *中国科学(D 辑)*, 2010, 40(2):127–137.
Sun Weidong, Ling Mingxing, Yang Xiaoyong, et al. Ridge subduction and porphyry copper gold mineralization: An overview [J]. *Science in China (Ser.D)*, 2010, 40(2):127–137 (in Chinese).
- [60] Jugo P J. Sulfur content at sulfide saturation in oxidized magmas [J]. *Geology*, 2009, 37(5):415–418.
- [61] Sun W D, Arculus R J, Kamenetsky V S, et al. Release of gold-bearing fluids in convergent margin magmas prompted by magnetite crystallization [J]. *Nature*, 2004, 431:975–978.
- [62] 孙卫东, 胡艳华, 丁兴, 等. 汇聚板块边缘岩浆中金属和氯的地球化学性质研究 [J]. *地学前缘*, 2007, 14(2):139–148.
Sun Weidong, Hu Yanhua, Ding Xing, et al. The geochemical behaviors of some metals and chlorine during the evolution of convergent margin magmas [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14 (2):139–148 (in Chinese with English abstract).
- [63] 辛洪波, 曲晓明. 西藏冈底斯斑岩铜矿带含矿岩体的相对氧化状态: 来自锆石 Ce(IV)/Ce(III) 比值的约束 [J]. *矿物学报*, 2008,

28(2):152–159.

Xin Hongbo, Qu Xiaoming. Relative oxidation states of ore – bearing porphyries inferred from Ce (IV)/Ce (III) ratio in zircon;

application to the porphyry copper belt at Gangdese, Tibet [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2008, 28(2):152–159(in Chinese with English abstract).

Genesis and metallogenic significance of the Indosinian intermediate–acidic intrusive rocks in the west porphyry belt, Zhongdian island arc, Yunnan

DONG Yi, LIU Xian–fan, DENG Jiang–hong,
LI Chun–hui, Yi LI–wen, ZOU Jin–xi, HUANG Yu–peng

(Institute of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: The west porphyry belt in the Zhongdian island arc is mainly composed of four Indosinian intermediate–acidic intrusive complex bodies, i.e., A’re, Chundu, Xuejiping and Lannitang, related somewhat to Cu mineralization. Geochemical characteristics of the A’re porphyry are similar to those of Adakite: $\text{SiO}_2 > 58.06\%$ (averagely 58.64%), Al_2O_3 (14.77%–17.29%), Sr (490×10^{-6} – 1409×10^{-6}), Sr/Y (37.44–83.79) and La/Yb (4.62–31.48, averagely 28.51) are high, Y (13.1×10^{-6} – 16.82×10^{-6}) and Yb (1.20×10^{-6} – 1.61×10^{-6}) are low, δEu is not distinct (0.90–1.02), Mg (0.91%–3.38%) and $\text{Mg}^\#$ (37.84–70.00) are high, chondrite–normalized REE patterns are rightly–oblique, and there exist enrichment of LREE and heavy depletion of HREE. All these features are similar to characteristics of the other three porphyries. Based on the studies of major oxides, REE and Sr, the authors hold that the intermediate–acidic intrusive complex bodies in the west porphyry belt characterized by island–arc rocks to adakitic rocks were most probably formed by the rifting of the subducting Ganzi–Litang oceanic crust, which caused the successive partial melting of the mantle wedge and oceanic crust, during which the partially melted primitive magma exerted multi–staged upward intrusion along the present Geza fault on the eastern side and was contaminated by the crust in varying degrees. The garnet + clinopyroxene + amphibole association remained in the magma source area. There is no distinct difference between the four porphyries in magmatic evolution. Various degrees of mantle–crustal contamination might have played a certain role in the diversities of mineralization.

Key words: adakite, oceanic crust input; partial melting; Zhongdian island arc; Yunnan

About the first author: DONG Yi, male, born in 1987, master candidate, majors in petrological geochemistry; E–mail: Grapedy@hotmail.com.