

文章编号: 1000-4734(2011)01-0043-12

云南中甸地区浪都高钾中酸性侵入岩 的地球化学特征

任涛^{1,2} 钟宏^{1*} 陈金法³ 朱维光¹ 张兴春¹(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 贵州省地质矿产资源开发股份有限公司, 贵州 贵阳 550004)

摘要: 中甸地区浪都中酸性侵入岩在空间上与浪都夕卡岩型铜矿床共生, 主要由石英二长斑岩、石英闪长斑岩和花岗闪长斑岩组成。这些侵入岩大多表现出高钾 (K_2O 大于 3%) 的特征, 在 K_2O-SiO_2 图上所有样品均落入高钾钙碱性和钾玄岩区域。在稀土元素球粒陨石标准化图上表现为轻稀土富集、重稀土亏损 ($La_N/Yb_N = 14.3 \sim 21.2$)、钕弱负异常至无异常 ($\delta Eu = 0.77 \sim 1.00$); 在原始地幔标准化微量元素蛛网图上, K、Rb、Sr、Ba 等元素表现出正异常, 而 Nb、Ta 和 Ti 等元素表现出负异常的特征。浪都侵入岩的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始值为 $0.7044 \sim 0.7069$, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 $-2.8 \sim -2.2$ 。结合主量、微量元素及 Sr-Nd 同位素组成, 本研究认为浪都岩浆来源于交代地幔, 很可能受到了俯冲带流体交代和地壳物质混染的影响, 表明浪都中酸性侵入岩的形成与甘孜-理塘洋的俯冲有关。

关键词: 高钾中酸性侵入岩; 地球化学; Sr-Nd 同位素; 岩石成因; 浪都; 云南

中图分类号: P581; P588.11; P595 **文献标识码:** A

作者简介: 任涛, 男, 1982 年生, 在读博士, 矿床地球化学专业。E-mail: rtao1982@126.com

高钾火山岩几乎产于除洋中脊以外的所有构造环境, 以产于与俯冲有关的岛弧和造山后伸展环境最多, 如: 泛非-巴西利亚造山带的柏柏尔地盾到博尔博雷玛地区, 特提斯构造域的西班牙、意大利、土耳其、伊朗等地也有产出, 美国内华达山脉中的高钾火山岩也被认为产于俯冲环境^[1-9]; 少数产于板内及大陆边缘环境, 如: 我国的桂东-粤西、黄石公园及南安第斯山部分高钾火山岩^[10-12]。我国青藏高原及周边地区也存在大范围的高钾火山岩, 但其成因一直存在争议。

近年来我国三江义敦岛弧南缘的中甸岛弧也发现一套高钾火山岩, 包括玄武岩、玄武质安山岩、安山岩, 且伴生有成因联系的中酸性侵入岩体^[13-14]。除该区南部崩哥正长岩体具有超钾特征 ($K_2O/Na_2O > 2$) 以外^[15-16], 其余火成岩多表现为钾质岩 ($0.5 < K_2O/Na_2O < 2$)。本文选择位于中甸岛弧东北部与浪都夕卡岩型 Cu 矿床有密切

成因联系的浪都岩体为研究对象, 在前人研究工作的基础上, 通过岩石的主量、微量元素及 Sr、Nd 同位素研究, 了解该区高钾中酸性侵入岩的岩石地球化学特征, 并探讨岩浆来源、演化过程及成矿意义。

1 区域地质

中甸岛弧是我国西南三江构造火成岩带中义敦岛弧的重要组成部分, 位于义敦岛弧的最南端。其东部和南部是甘孜-理塘板块缝合带, 西部是乡城-格咱深大断裂, 该断裂向 SSE 方向延伸, 与甘孜-理塘缝合带相接, 从而在南部封闭了中甸弧 (图 1)^[13, 14, 17, 18]。

区域出露地层从老到新主要有中二叠统聂耳堂刀组, 分布于东南部, 岩性为板岩加少量玄武岩、凝灰岩及灰岩; 上三叠统曲嘎寺组、图姆沟组和喇嘛垭组, 其中曲嘎寺组为一套杂砂岩、绢云母板岩, 局部夹致密块状蚀变玄武岩; 图姆沟组岩性为板岩、砂岩和安山岩; 喇嘛垭组为粉砂质板岩和层状细-中粒石英砂岩, 岩相特征为滨海相-陆相环境^[13-14]。

收稿日期: 2010-07-14

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-111、KZCX2-YW-136); 中国科学院“百人计划”

* 通讯作者, E-mail: zhonghong@vip.gyig.ac.cn

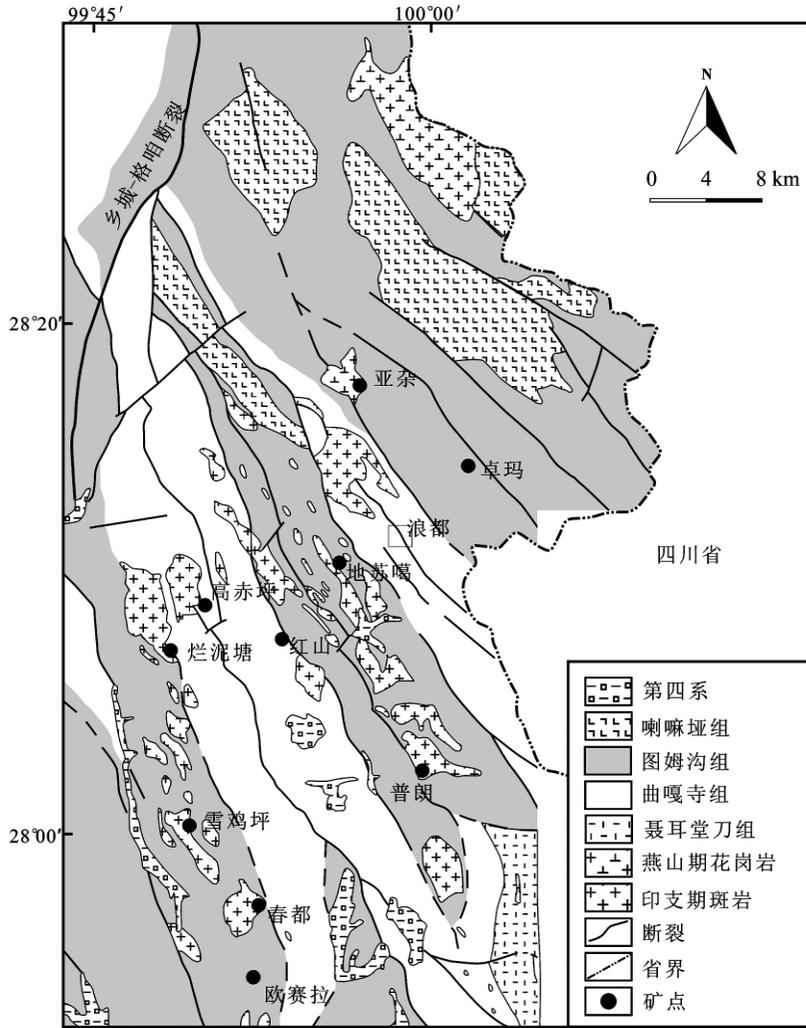


图1 中甸地区地质图(引自云南省浪都矿床首采区详查报告修改)

Fig. 1. Geological map of Zhongdian area.

区内多旋回构造运动伴随多期次的岩浆活动。晚三叠世早期,甘孜-理塘洋开始向西俯冲,火山弧的发育和演化大致经历了洋壳俯冲(210~235 Ma)、陆陆碰撞(80~88 Ma)和陆内汇聚(28~53 Ma)三大构造作用^[13,14,19]。对应的岩浆活动大体也可以分为三个期次:印支期、燕山期和喜山期。

印支期为一套巨厚的玄武岩-安山岩及中酸性浅成-超浅成斑(玢)岩。曲嘎寺组(晚三叠世卡尼期)二段以致密块状玄武岩为主,其次为安山质-玄武质火山角砾岩、杏仁状玄武岩;上部主要为蚀变玄武岩、蚀变玄武质凝灰岩、玄武质火山角砾岩^[14-15]。中酸性火山岩产于图姆沟组(晚三叠世卡尼期至诺利期)二段,火山活动强度明显超过曲嘎寺组,多呈似层状产出;主要岩石类型有

安山岩、英安岩、流纹岩、安山质火山角砾岩、安山质凝灰岩、安山质角砾凝灰岩、英安质凝灰岩等^[14]。这些火山岩大多属于钙碱性系列,总体具有高钾特点^[13]。区内印支期侵入岩主要是中酸性浅成斑岩,包括石英闪长玢岩、石英二长斑岩、花岗闪长斑岩、英安斑岩等,在空间上与三叠纪火山岩相伴生,被认为与同期安山岩有密切成因联系^[13-14,17-18,20-21]。而且,该区印支期中酸性侵入岩与铜多金属成矿或矿化作用有密切成因联系,形成了众多经济价值巨大的斑岩型、夕卡岩型铜多金属矿床,如普朗、雪鸡坪斑岩型Cu矿床和浪都夕卡岩型Cu矿床等^[13,17]。

燕山期侵入岩主要有热林和休瓦促岩体,岩性为似斑状黑云二长花岗岩,其形成的构造环境为弧-陆碰撞后陆壳隆升伸展环境^[13-14]。区内喜

山期岩浆活动较少,多分布在早期斑岩的边缘部分,以亚杂英安斑岩东侧的深灰色闪长玢岩最为典型,其角闪石 Ar-Ar 坪年龄结果为 $53.02 \pm 1.06 \text{ Ma}^{[17-18]}$ 。

2 浪都高钾钙碱性侵入岩的岩石学特征

浪都地区出露较多的浅成-超浅成侵入岩体,主要为复式中酸性斑(玢)岩体,出露面积约 0.9 km^2 (图 2)。这些侵入体的产出受北西向的沃迪措断裂及北东向的比都断裂控制,沿北西向浪都次级背斜倾末端顺层侵位于上三叠统图姆沟组和曲嘎寺组地层的层间破碎带及断裂破碎带中(图 2)。岩体以石英二长斑岩为主,还出现石英闪长斑岩和少量花岗闪长斑岩;岩体的岩相分带不明显,主要为斑状-细粒结构,块状构造。

本次研究的样品均采自矿区外围的新鲜岩石,镜下观察未发现明显的蚀变。石英二长斑岩呈灰色带浅肉红色,斑状结构,斑晶成分有斜长石(25%)、钾长石(15%)、黑云母和角闪石(5%)、

石英(5%)等,基质包括斜长石(20%)、钾长石(15%)、石英(10%)、黑云母和角闪石(5%);花岗闪长斑岩呈浅灰色,斑状结构,块状构造,斑晶成分有斜长石(30%)、钾长石(10%)、角闪石和黑云母(10%)、石英(5%)等,基质有斜长石(25%)、钾长石(10%)、石英(10%)等;石英闪长斑岩呈灰色,斑状结构,块状构造,斑晶成分有斜长石(20%)、角闪石(8%)、黑云母(5%)等,基质有斜长石(40%)、石英(15%)、黑云母和角闪石(7%)、钾长石(5%)等。副矿物主要由榍石、锆石、磷灰石等组成。

石英二长斑岩在矿区分布最广,也是产生夕卡岩的主要岩浆岩,如图 2 在空间关系上除了 IV 矿体群与花岗闪长斑岩有关外,其余矿体都产于石英二长斑岩的接触带或岩体内部。曾普胜等^[17]对从石英二长斑岩中分选出来的黑云母进行 Ar-Ar 定年,结果为 $216.93 \pm 4.34 \text{ Ma}$,基本上确定为印支期,与中甸地区普朗、雪鸡坪、红山等侵入岩近于同时代形成。

3 分析方法

岩石主量、微量元素和 Sr、Nd 同位素分析均在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。主量元素分析采用 PANalytical Axios-advance 型 XRF 测定,分析精度优于 5%。微量元素用 Perkin-Elmer Sciex ELAN DRC-e 型 ICP-MS 分析,详细分析流程见 Qi 等^[22],以国际标样 AMH-1 和 OU-6 监控数据质量,分析精度优于 5%。Sr、Nd 同位素分析仪器为 Thermo Fisher 公司的 TRITON 型质谱仪,Sr 同位素质量分馏用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 校正,国际标样 NBS987 的测试结果为 $0.710250 \pm 7 (2\sigma)$;Nd 同位素质量分馏用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 校正,国际标样 BCR-2 和 JNdi-1 的测试结果为 $0.512612 \pm 8 (2\sigma)$ 和 $0.512104 \pm 5 (2\sigma)$ 。

4 分析结果

4.1 主量元素

浪都岩体代表性样品的主量元素和微量元素分析结果见表 1。所有样品的 SiO_2 含量变化范围较小(60.8%~63.6%),属中酸性岩石,全碱含量较高(6.53%~8.22%)。在岩石 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 分类图上,所有样品均位于二长岩与石英二

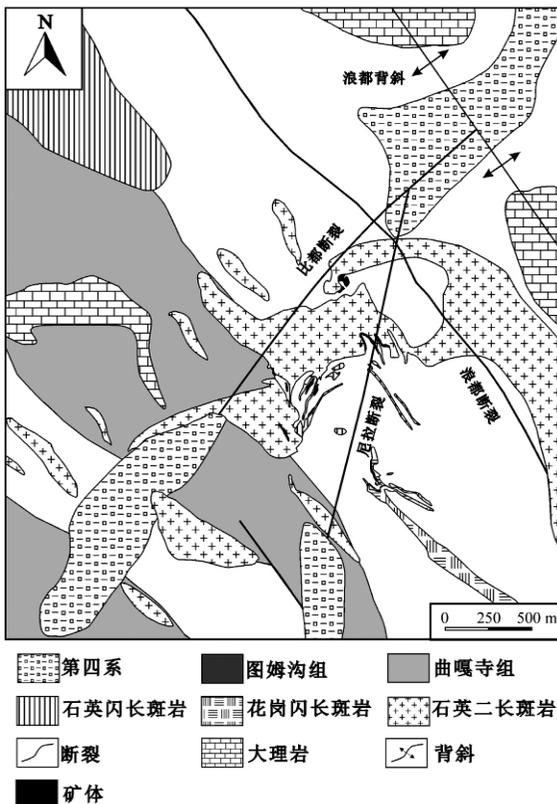


图 2 浪都岩体地质简图(修改自云南省浪都矿床首采区详查报告)

Fig. 2. Geological sketch map of the Langdu intrusive rocks.

长岩区域,属钙碱性系列(图3a)。这些样品的 Al_2O_3 含量为13.98%~15.25%,在ANK-ACNK图解中均投影至准铝质区域(图3b)在 K_2O-SiO_2 图上,落入高钾钙碱性和钾玄岩区域(图3c)。尽管这些样品的 K_2O 含量很高,但 K_2O/Na_2O 比

值为1.03~1.79,为典型的钾质系列岩石,而非超钾质系列(图3d)。在Harker图解上, CaO 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 Fe_2O_3 、 MgO 等氧化物与 SiO_2 的含量呈负相关关系, Na_2O 、 K_2O 与 SiO_2 相关性不明显(图4)。

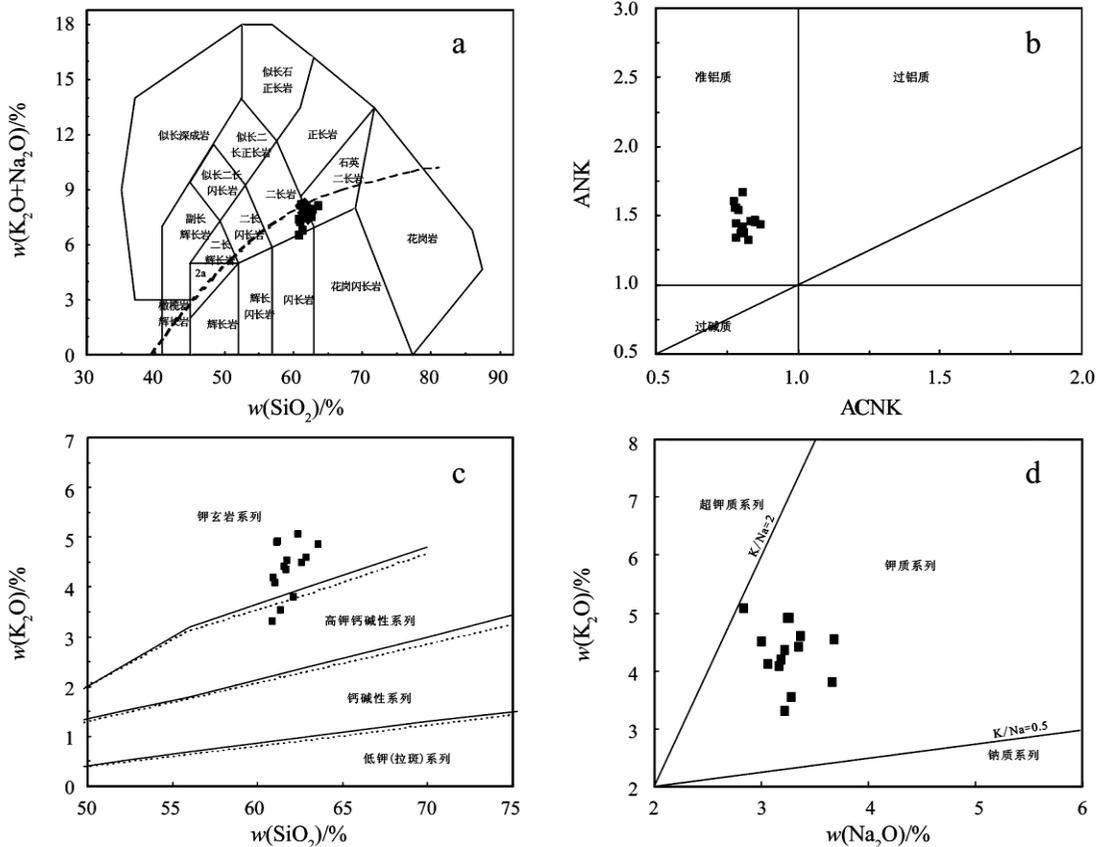


图3 (a) 浪都侵入岩的TAS分类图解; (b) 铝饱和指数图解; (c) K_2O-SiO_2 图解; (d) K_2O-N_2O 图解
Fig. 3. (a) TAS classification of the Langdu intrusives; (b) alumina saturation of the Langdu intrusives; (c) plot of K_2O vs. SiO_2 of the Langdu intrusives; and (d) plot of K_2O vs. Na_2O of the Langdu intrusives.

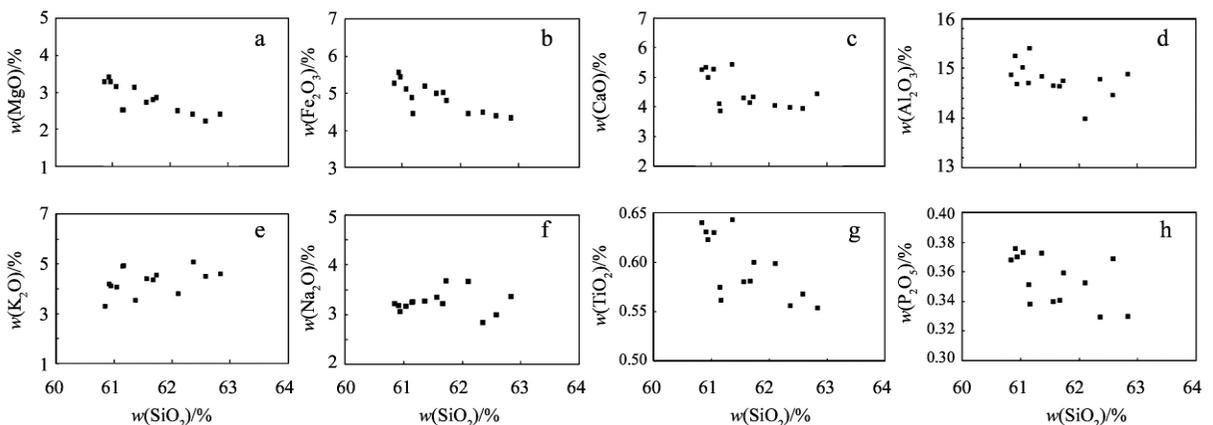


图4 浪都侵入岩的Harker图解
Fig. 4. Harker diagram of the Langdu intrusive rocks.

4.2 微量元素

在球粒陨石标准化图中 (图 5a), 浪都高钾钙碱性侵入岩显示出轻稀土元素 (LREE) 富集、

重稀土元素 (HREE) 亏损 ($(La/Yb)_N = 14.3 \sim 21.2$) 的特征, Eu 弱负异常至无异常 ($\delta Eu = 0.77 \sim 1.00$)。

浪都高钾侵入岩的 Rb、Zr 含量随着 SiO_2 含

表 1 浪都侵入岩的主量 (%) 和微量元素 ($\mu g/g$) 分析结果
Table 1. Major (%) and trace ($\mu g/g$) elements of the Langdu intrusive rocks

样品	石英二长斑岩						
	LD07-33	LD07-34	LD07-35	LD07-37	LD07-38	LD07-43	LD07-44
SiO ₂	60.91	61.36	60.84	60.94	61.04	61.14	61.56
Al ₂ O ₃	15.25	14.84	14.87	14.68	15.01	14.70	14.65
Fe ₂ O ₃	5.57	5.20	5.28	5.44	5.11	4.89	5.00
MgO	3.41	3.14	3.28	3.28	3.16	2.52	2.73
CaO	5.34	5.44	5.25	4.99	5.28	4.11	4.31
Na ₂ O	3.18	3.28	3.22	3.06	3.16	3.24	3.35
K ₂ O	4.20	3.55	3.31	4.12	4.08	4.91	4.42
MnO	0.08	0.07	0.10	0.11	0.07	0.08	0.11
P ₂ O ₅	0.38	0.37	0.37	0.37	0.37	0.35	0.34
TiO ₂	0.63	0.64	0.64	0.62	0.63	0.58	0.58
LOI	0.99	2.41	1.75	1.41	1.16	3.23	2.59
Total	99.94	100.29	98.91	99.03	99.07	99.74	99.63
Sc	16.0	16.0	15.3	14.3	16.2	12.7	13.2
V	132	131	143	138	131	112	125
Cr	66.7	63.5	63.3	66.3	79.9	55.8	49.4
Co	15.3	14.0	15.2	16.4	14.5	10.7	13.5
Rb	125	107	113	174	122	173	129
Sr	858	877	941	719	874	735	739
Y	16.1	16.2	16.5	16.2	15.9	15.0	16.1
Zr	149	138	110	169	118	106	169
Nb	9.71	10.40	10.12	11.81	9.80	10.1	10.6
Ba	1830	1500	1498	1095	1770	1580	1701
Hf	3.88	3.75	2.97	2.79	3.25	2.97	4.28
Ta	0.69	0.77	0.83	0.64	0.71	0.75	0.84
Pb	8.90	10.3	21.4	6.62	11.3	13.6	34.5
Th	16.2	17.3	14.8	12.4	16.6	16.0	13.8
U	3.50	3.75	3.84	3.17	3.53	3.29	4.05
La	36.6	34.7	33.4	23.5	39.0	35.2	30.3
Ce	62.8	60.2	60.7	46.5	66.7	60.3	55.4
Pr	7.17	6.77	7.05	4.60	7.51	6.71	6.29
Nd	26.4	25.6	26.2	17.1	27.9	25.1	23.3
Sm	5.00	5.01	5.06	3.23	5.43	4.72	4.47
Eu	1.34	1.30	1.42	0.77	1.36	1.25	1.27
Gd	3.84	3.52	4.15	2.64	3.59	3.13	4.03
Tb	0.63	0.64	0.60	0.39	0.67	0.57	0.53
Dy	2.92	2.95	3.22	1.81	2.92	2.67	3.02
Ho	0.58	0.57	0.58	0.36	0.57	0.55	0.55
Er	1.59	1.59	1.61	1.00	1.55	1.44	1.54
Tm	0.23	0.21	0.21	0.14	0.21	0.19	0.21
Yb	1.43	1.44	1.37	0.93	1.34	1.26	1.43
Lu	0.21	0.21	0.23	0.14	0.20	0.19	0.22

续表 1

样品	石英闪长斑岩	石英闪长斑岩	石英闪长斑岩	石英闪长斑岩	花岗闪长斑岩	花岗闪长斑岩	花岗闪长斑岩
	LD07-45	LD07-47	LD08-01	LD08-02	LD08-03	LD08-10	LD07-17
SiO ₂	62.10	61.67	61.73	61.16	62.58	62.36	62.83
Al ₂ O ₃	13.98	14.64	14.75	15.40	14.46	14.78	14.88
Fe ₂ O ₃	4.46	5.01	4.80	4.45	4.39	4.49	4.34
MgO	2.50	2.80	2.86	2.53	2.22	2.42	2.42
CaO	4.04	4.15	4.34	3.86	3.94	3.99	4.44
Na ₂ O	3.66	3.22	3.68	3.26	3.00	2.83	3.36
K ₂ O	3.81	4.36	4.54	4.93	4.50	5.08	4.60
MnO	0.11	0.12	0.09	0.06	0.05	0.07	0.07
P ₂ O ₅	0.35	0.34	0.36	0.34	0.37	0.33	0.33
TiO ₂	0.60	0.58	0.60	0.56	0.57	0.56	0.55
LOI	3.64	2.02	2.51	3.90	4.55	3.26	2.42
Total	99.24	98.90	100.25	100.45	100.63	100.16	100.24
Sc	14.0	12.3	15.0	14.0	13.2	7.4	14.4
V	99.4	121	113	112	103	113	119
Cr	50.1	48.8	44.0	62.8	36.7	56.7	51.5
Co	9.56	13.3	12.9	12.6	14.1	13.3	15.2
Rb	108	123	118	175	73.7	131	211
Sr	625	829	881	820	753	896	659
Y	14.1	15.4	17.4	15.6	9.69	15.8	15.1
Zr	131	155	182	161	177	116	172
Nb	10.4	10.3	10.9	10.8	9.85	10.0	10.3
Ba	1168	1788	1433	1346	1400	5160	1350
Hf	3.26	3.77	2.69	2.52	4.43	2.92	4.07
Ta	0.86	0.80	0.50	0.54	0.55	0.75	0.75
Pb	14.7	26.9	12.0	8.69	9.96	12.9	5.08
Th	16.5	15.3	10.4	12.5	8.95	14.0	17.0
U	3.70	4.00	2.54	2.91	3.82	3.65	3.27
La	32.9	30.9	26.0	24.9	24.3	31.6	34.6
Ce	59.5	56.4	50.2	48.6	47.7	58.7	57.7
Pr	6.57	6.32	4.96	4.71	5.21	6.69	6.41
Nd	23.9	23.4	17.9	17.5	19.1	24.6	23.1
Sm	4.60	4.43	3.60	3.17	3.78	4.79	4.51
Eu	1.01	1.20	0.85	0.76	1.06	1.10	1.26
Gd	3.63	3.88	2.71	2.76	2.45	4.25	3.07
Tb	0.51	0.57	0.40	0.37	0.47	0.57	0.54
Dy	2.67	2.86	1.84	1.81	2.20	3.00	2.51
Ho	0.49	0.55	0.35	0.35	0.46	0.52	0.52
Er	1.26	1.49	1.00	0.94	1.25	1.52	1.36
Tm	0.18	0.20	0.12	0.12	0.16	0.20	0.18
Yb	1.20	1.44	0.83	0.83	1.12	1.35	1.19
Lu	0.16	0.21	0.13	0.12	0.17	0.21	0.18

量增加而显著升高(图 6a, d), 相应的 Sr、Ba 含量则明显降低(图 6b, c)。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 5b), 浪都岩体具有高度一致的配分曲线, 所有样品均表现为大离子亲石元素(LILE)及 Sr、Pb 富集, 而 Nb、Ta、Ti 等元素显示出明显亏损的特征。可见, 浪都岩体的微量元素特征与中甸地区普朗及雪鸡坪侵入岩的配分形式非常相似(图略)^[14, 20, 21], 同时也与世界其他地

区产于造山环境的富钾火山岩微量元素特征相似^[7]。

4.3 Sr-Nd 同位素特征

浪都岩体的 Sr 和 Nd 同位素的分析结果列于表 2, 本文的初始 Sr、Nd 同位素比值均根据 $t = 216 \text{ Ma}$ 计算^[18], ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 比值变化于 0.7044 ~ 0.7069 之间, ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i 变化范围较小, 为

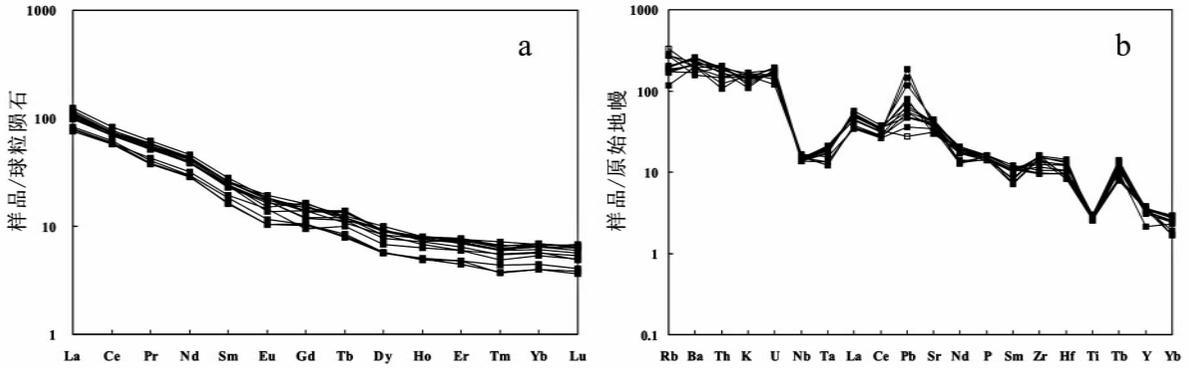


图 5 球粒陨石标准化图解 (a) 浪都侵入岩的稀土元素; (b) 微量元素蛛网图 标准化值据文献 [35]
 Fig. 5. (a) Chondrite-normalized REE diagram of the Langdu intrusives and (b) primitive mantle-normalized trace element distribution spidergrams of the Langdu intrusives.

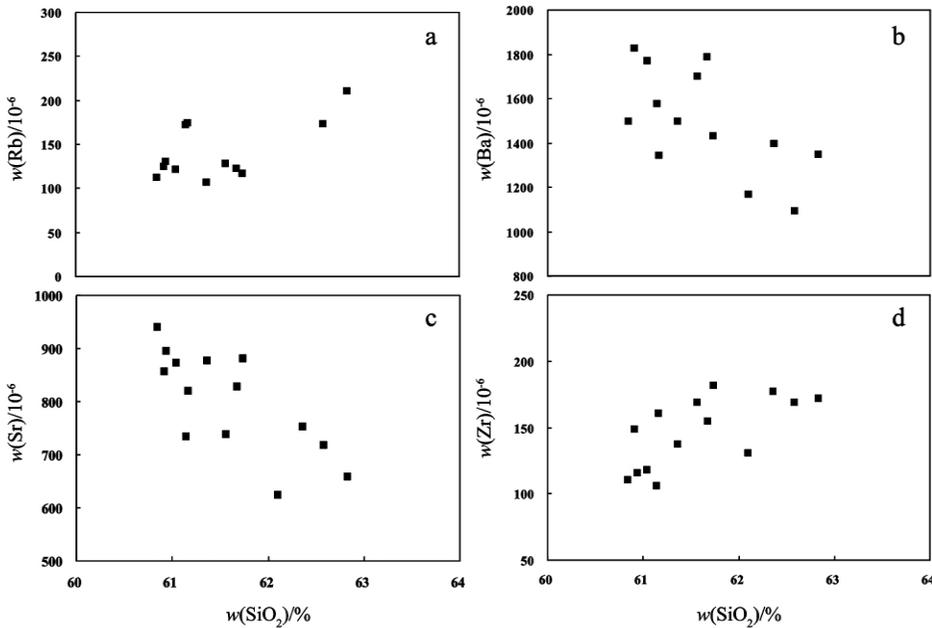


图 6 浪都侵入岩的微量元素随 SiO₂ 变化图解

Fig. 6. Selected variation diagrams of the trace elements and silica of the Langdu intrusives.

0.512214 ~ 0.512249, 对应的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 -2.8 ~ -2.2, 这表明岩浆源区同位素组成比较均一。在 Sr-Nd 同位素组成图上(图 7a), 浪都高钾侵入岩与西澳、Ullung-do、Batu Tara 等地的富钾火山岩及中甸地区图姆沟组安山岩、普朗斑岩和雪鸡坪斑岩的 Sr-Nd 同位素组成相似^[25, 34]。

5 讨论

前人对世界上一些典型的钾质火山岩研究认为钾质火山岩的物质来源和成因模式主要有以下

3 种: ① LILE 和轻稀土元素富集的交代地幔, 如西澳大利亚 Roccamonfia 地区、意大利中部、巴西 Boreborema 省和伊朗等地的富钾火山岩, 这一富集地幔源区被认为主要与俯冲沉积物, 尤其是大洋沉积物的混染有关^[1-8]; ② 来源于未交代的软流圈地幔的小部分熔融, 并经历了强烈的结晶分异作用, 如美国内华达山脉中的富钾火山岩^[9]; ③ 软流圈地幔部分熔融与上覆岩石圈地幔相互作用, 如我国粤西-桂东的富钾火山岩^[11-12]。

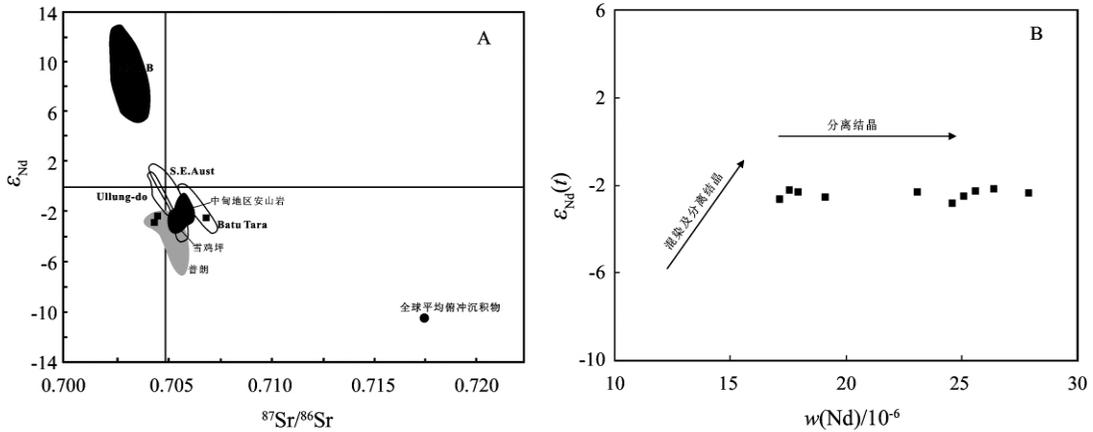


图7 (a) 浪都侵入岩的 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解, 中甸安山岩数据及雪鸡坪斑岩同位素数据来源于文献[34]; 普朗斑岩数据来源于文献[25]; (b) $\epsilon_{Nd}(t) - \text{Nd}$ 图解

Fig. 7. (a) $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ for Langdu intrusives; isotope data for andesites of the Zhongdian area and Xuejiping intrusive rocks and the Pulang porphyry and (b) $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. Nd for the Langdu intrusives.

表2 浪都侵入岩 Sr-Nd 同位素分析数据

Table 2. Sr-Nd isotopic data for Langdu intrusive rocks

样号	Rb/($\mu\text{g/g}$)	Sr/($\mu\text{g/g}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$		
LD-0733	125	858	0.4216	0.707102	± 6	0.705653		
LD-0734	107	877	0.3530	0.707130	± 5	0.705590		
LD-0738	122	874	0.4039	0.707092	± 5	0.705667		
LD-0743	173	735	0.6811	0.707679	± 5	0.704442		
LD-0801	117	881	0.3865	0.706845	± 4	0.706862		
LD-0802	175	820	0.6173	0.707494	± 4	0.704631		
LD-0803	173	719	0.6999	0.707826	± 3	0.705801		
LD-0804	158	363	1.2595	0.708328	± 4	0.706041		
LD-0810	73.7	753	0.6675	0.708921	± 5	0.705846		
LD-0817	211	659	0.9265	0.707489	± 5	0.705578		
样号	Nd/($\mu\text{g/g}$)	Sm/($\mu\text{g/g}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{143}\text{Nd}$	2σ	$(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_i$	$\epsilon_{Nd}(t)$	T_{2DM}/Ma
LD-0733	26.4	5.00	0.1144	0.512411	± 1	0.512240	-2.15	1171
LD-0734	25.6	5.01	0.1182	0.512412	± 1	0.512246	-2.24	1178
LD-0738	27.9	5.43	0.1176	0.512405	± 2	0.512224	-2.36	1188
LD-0743	25.1	4.72	0.1136	0.512393	± 1	0.512214	-2.48	1198
LD-0801	17.9	3.60	0.1214	0.512412	± 1	0.512229	-2.32	1185
LD-0802	17.5	3.17	0.1091	0.512401	± 1	0.512242	-2.20	1175
LD-0803	17.1	3.23	0.1140	0.512386	± 2	0.512249	-2.63	1210
LD-0804	24.6	4.88	0.1199	0.512384	± 1	0.512244	-2.83	1226
LD-0810	19.1	3.78	0.1196	0.512399	± 1	0.512238	-2.53	1202
LD-0817	23.1	4.51	0.1180	0.512409	± 1	0.512232	-2.29	1182

5.1 岩浆源区

浪都中酸性侵入岩与区域上广泛发育的图姆沟组安山岩在空间上共生, 岩体的侵入年龄和火山岩的喷出时间也近于一致^[13], Sr-Nd 同位素组

成也极其相似 (图 7a)。Roberts^[23] 基于实验研究认为高钾钙碱性岩石最合适的源区物质是含水的、钙碱性和高钾钙碱性的安山质和玄武安山质岩浆, 表明安山岩岩浆和侵入岩岩浆的来源可能有密切联系。杨岳清^[13] 和侯增谦^[14] 认为中甸

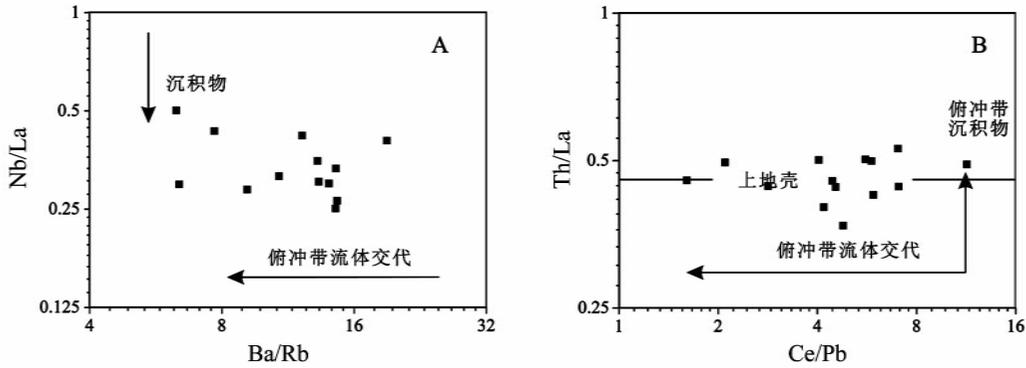


图 8 浪都侵入岩的 Nb/La-Ba/Rb 和 Th/La-Ce/Pb 图解

Fig. 8. Nb/La vs. Ba/Rb and Th/La vs. Ce/Pb of the Langdu intrusives.

岛弧带安山岩来源于交代地幔的部分熔融。而不同于区域上的玄武岩。本研究获得的 Sr-Nd 同位素组成与北部乡城岛弧花岗岩的岩浆源区(中元古代下地壳部分熔融形成^[24])也有很大差异。同时本文计算获得了浪都侵入岩的 Nd 两阶段模式(亏损地幔)年龄为 1171 ~ 1226 Ma (表 2) 与中甸地区多数侵入岩及该区安山岩的两阶段模式年龄相似(1111 ~ 1218 Ma)。王守旭^[25]认为这种 Nd 模式年龄可能代表更古老的地壳物质与地幔物质以不同比例混合,以地幔物质为主。

浪都中酸性岩体具有中等-较高的相容元素(Cr = 36.7 ~ 79.9 $\mu\text{g/g}$ 、Co = 9.6 ~ 16.4 $\mu\text{g/g}$)、CaO (3.9% ~ 5.4%) 和 MgO (2.2% ~ 3.4%) 含量,暗示了幔源组分对母岩浆成分有较大贡献。而大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE)富集及弱负 ε_{Nd} 值又反映了壳源物质对岩浆成分的贡献。如图 8a, 较低的 Ba/Rb (<50) 和 Nb/La (<1) 比值,一方面说明岩浆源区与俯冲带有关,同时暗示沉积物对本区岩浆作用的影响。较低的 Ce/Pb (<20) 和较高的 Th/La (>0.25) 比值(图 8b) 则反映了俯冲带流体交代作用及壳源物质加入对本区岩浆源区的影响。

岩体富 K、LREE 及 Sr、Nd 同位素组成较为富集,表明母岩浆可能主要来自于经过流体交代的岩石圈地幔。浪都侵入岩具有 LREE 及 LILE 元素富集和 Nb、Ta 等元素亏损的特征,并且具有高度均一的同位素组成,在 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ -Nd 图上(图 7b),浪都高钾侵入岩也显示出以分离结晶为主的演化过程,表明壳源物质加入及流体交代作用可能主要发生在岩浆源区。

综上所述,本文提出浪都侵入岩的岩浆源区形成可能经历了两个阶段。第一阶段表现为流体

交代岩石圈地幔。La、Rb、Zr、Ce、Nd、Sm、Eu、Tb、Hf、Ta、U 和 Th 等元素含量低及 Sr-Nd 同位素亏损的岩石圈地幔被交代为富集大离子亲石元素(LILE)、轻稀土元素(LREE)和 Sr-Nd 同位素的交代地幔。第二个阶段交代地幔与陆源物质相互作用,导致原始岩浆更为富集 Al_2O_3 和 Sr-Nd 同位素。

5.2 分离结晶作用

浪都高钾侵入岩的 CaO、TiO₂、P₂O₅、Fe₂O₃ 和 MgO 等氧化物随着 SiO₂ 升高而系统降低(图 4),暗示本区中酸性岩浆存在辉石、磷灰石及钛铁矿等矿物的分离结晶; Al₂O₃ 与 SiO₂ 呈负相关关系,而 Na₂O、K₂O 与 SiO₂ 相关性不明显(图 4),表明长石的分离结晶作用影响不明显或存在少量长石堆晶。在稀土元素球粒陨石标准化图解中(图 5a) 没有出现明显的中稀土元素亏损,表明在岩浆演化过程中没有发生大量角闪石的分离结晶;同时 Y 随着 SiO₂ 升高并没有显著变化(图 9),也说明角闪石的分离结晶作用对岩浆演化过程影响不大。Sr、Ba 随着 SiO₂ 升高而降低, Rb 与 SiO₂ 无明显相关关系(图 6),且 Eu 表现出弱负异常至无异常($\delta\text{Eu} = 0.77 \sim 1.0$),表明少量样品受到钾长石分离结晶作用的影响。

5.3 浪都岩浆过程

前人研究认为,中甸地区在早三叠世位于甘孜-理塘洋盆西侧的被动大陆边缘,晚三叠世早期甘孜-理塘洋壳向西俯冲,消减于中甸微陆块之下^[13, 15, 26],中甸褶皱带东缘由被动大陆边缘转为活动大陆边缘,沿俯冲方向依次发育岛弧和弧后

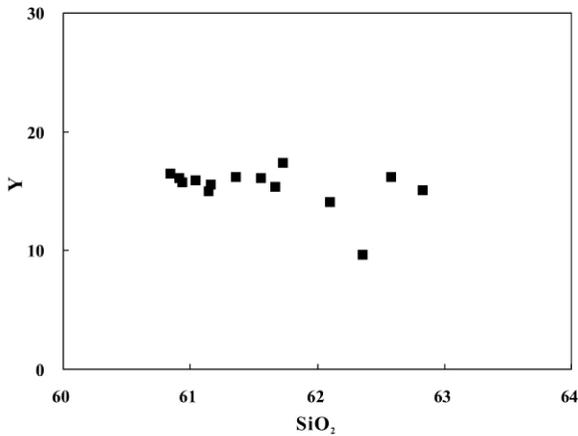


图9 浪都侵入岩的 Y-SiO₂ 图解

Fig. 9. Y vs. SiO₂ of the Langdu intrusives.

盆地,构成了完整的沟-弧-盆体系^[27-28]。在中甸地区依次发育了曲嘎寺组玄武岩、玄武安山岩,图姆沟组安山岩及中酸性岩体,它们在时间上先后产出、空间上紧密相关,表现出一个完整的火山岩序列。

因此,本文结合前述讨论与前人研究成果,认为浪都高钾侵入岩的形成过程如下:晚三叠世卡尼期(210~235 Ma)甘孜-理塘洋向西俯冲,洋壳及沉积物一同带入俯冲带,随着俯冲深度的增加,温度、压力升高,俯冲板片和沉积物发生变质、脱水,形成富含轻稀土元素(LREE)和大离子亲石元素(K、Rb、Sr、U、Th),贫高场强元素(HFSE)的俯冲带流体,大量沉积物的加入导致这种流体富钾,而后交代地幔发生部分熔融,形成浪都中酸性岩浆。

5.4 成矿意义

截止目前,中甸岛弧带已发现金属矿床(点)30余处,以红山背斜为轴构成东、西两条成矿带:①西成矿带,北起高赤坪,经雪鸡坪、春都,向南至欧赛拉-阿热一带,构成一个北北西向展布的斑岩铜矿带;②东成矿带,分布在地苏嘎-普朗一线的广大地区,已发现普朗、松诺、地苏嘎、欠虽、亚杂等斑岩-夕卡岩矿床(点),规模不等。其中普朗斑岩铜矿床预测铜资源量达436万吨^[25],具有超大型矿床的潜力,雪鸡坪斑岩型铜矿床和红山夕卡岩型铜矿床也已经达到中型规模^[14],本文研究的浪都夕卡岩型铜矿床也已达到中型规模。

前人通过对我国土屋、德兴、玉龙和南美等斑岩铜矿床的研究,发现其岩浆及成矿元素均来自

上地幔^[29-30]。Sillitoe^[31-32]认为大洋中的沉积物、玄武质熔岩和辉长岩等含铜较高的岩石是斑岩铜矿成矿物质的主要来源。同时Sawkins(1972)^[33]认为当岩浆保持亏损上地幔原有的地球化学特征时,它们具有较高的 $f(O_2)$ ($10^{-8} \sim 10^{-12}$)、较低的初始锶值(<0.708)、亏损高强场元素、富集不相容元素,与含铜斑岩成分相似。

中甸地区主要斑岩/夕卡岩型铜矿床的同位素组成变化较小,如:本文研究的浪都侵入岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7044 \sim 0.7069$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -2.8 \sim -2.2$,相邻普朗斑岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7043 \sim 0.7057$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -6.8 \sim -2.6$ ^[25],雪鸡坪斑岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7051 \sim 0.7059$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -3.3 \sim -2.3$ ^[34],说明中甸地区斑岩主要来源于交代地幔,其本身具有很高的铜含量,这可能是中甸岛弧带能形成如此众多的斑岩型/夕卡岩型Cu(Au)矿床的原因。

6 结论

(1)浪都侵入岩分布于甘孜-理塘洋缝合带附近,所有样品的SiO₂含量变化范围较小(60.8%~63.6%),全碱含量较高(6.53%~8.22%),在化学成分上属于高钾钙碱性岩系。岩石形成受辉石、磷灰石及钛铁矿等矿物少量分离结晶作用的影响,而角闪石没有发生明显的分离结晶作用。

(2)浪都侵入岩以富集轻稀土和大离子亲石元素、亏损重稀土元素为特征,所有样品均相对亏损Nb、Ta、Ti元素,这一配分形式与中甸地区火山弧岩浆岩的配分形式非常相似,同时也与世界其他地区产于造山环境的富钾火山岩微量元素特征相似。

(3)浪都侵入岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值为0.7044~0.7069, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-2.8~-2.2,且具有中等-较高的相容元素(Cr=36.7~79.9 μg/g, Co=9.6~16.4 μg/g)、CaO(3.9%~5.4%)和MgO(2.2%~3.4%)含量,而不相容元素(LILE)和轻稀土元素(LREE)富集,及较低的Ba/Rb、Nb/La和Ce/Pb比值,表明浪都高钾侵入岩岩浆主要来源于受俯冲带流体及陆源物质交代的地幔。

致谢:野外工作过程中得到了云南地勘局华西矿业公司杨朝志、云南省地质调查院矿产调查所王外全所长及曹晓明等高级工程师的帮助;主量、微量元素及Sr-Nd同位

素分析得到了中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室冯彩霞、胡静、包广萍、肖芳、李晓彪等的

帮助; 审稿专家的意见也使作者受益匪浅, 在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献:

- [1] Foley S. Potassic and ultrapotassic magmas and their origin [J]. *Lithos*, 1992, 28: 181-185.
- [2] Rottura A, Bargossi G M, Caggianelli A, et al. Origin and significance of the Permian high-K calc-alkaline magmatism in the central-eastern Southern Alps, Italy [J]. *Lithos*, 1998, 45(1-4): 329-348.
- [3] Benito R, Lopez-Ruiz J, Cebriá J M, et al. Sr and O isotope constraints on source and crustal contamination in the high-K calc-alkaline and shoshonitic Neogene volcanic rocks of SE Spain [J]. *Lithos-Amsterdam*, 1999, 46(4): 773-804.
- [4] Neves S, Mariano G, Guimaraes I, et al. Intralithospheric differentiation and crustal growth: Evidence from the Borborema Province, north-eastern Brazil [J]. *Geology*, 2000, 28(6): 519-522.
- [5] Acef K, Liégeois J, Ouabadi A, et al. The Anfeq post-collisional Pan-African high-K calc-alkaline batholith (Central Hoggar, Algeria), result of the LATEA microcontinent metacratonization [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2003, 37(3): 295-311.
- [6] Njanko T, Nédélec A and Affaton P. Synkinematic high-K calc-alkaline plutons associated with the Pan-African Central Cameroon shear zone (W-Tibati area): Petrology and geodynamic significance [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2006, 44(4-5): 494-510.
- [7] Boztug D, Arehart G, Platevoet B, et al. High-K, calc-alkaline I-type granitoids from the composite Yozgat batholith generated in a post-collisional setting following continent-oceanic island arc collision in central Anatolia, Turkey [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2007, 91(3): 191-223.
- [8] Oyhant A P, Siegesmund S, Wemmer K, et al. Post-collisional transition from calc-alkaline to alkaline magmatism during transcurrent deformation in the southernmost Dom Feliciano Belt (Braziliano-Pan-African, Uruguay) [J]. *Lithos*, 2007, 98(1-4): 141-159.
- [9] Putirka K, Busby C. The tectonic significance of high-K₂O volcanism in the Sierra Nevada, California [J]. *Geology*, 2007, 35(10): 923-926.
- [10] Morrison G. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association [J]. *Lithos*, 1980, 13(1): 97-108.
- [11] 李献华, 周汉文, 刘颖, 等. 粤西阳春中生代钾玄质侵入岩及其构造意义: I. 岩石学和同位素地质年代学[J]. *地球化学*, 2000, 29(6): 513-520.
- [12] 李献华, 周汉文, 刘颖, 等. 粤西阳春中生代钾玄质侵入岩及其构造意义: II. 微量元素和 Sr-Nd 同位素地球化学[J]. *地球化学*, 2001, 30(1): 57-65.
- [13] 杨岳清, 侯增谦, 黄典豪, 等. 中甸弧碰撞造山作用和岩浆成矿系统[J]. *地球学报*, 2002, 23(1): 17-24.
- [14] 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.
- [15] 曹殿华. 中甸地区斑岩铜矿成矿模式与综合勘查评价技术研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2007.
- [16] 曹殿华, 王安建, 修群业, 等. 中甸地区甬哥正长岩地球化学特征及其地质意义[J]. *地质学报*, 2007b, 81(7): 995-1003.
- [17] 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, 22(4): 393-400.
- [18] 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.
- [19] 侯增谦, 曲晓明, 周继荣, 等. 三江地区义敦岛弧碰撞造山过程: 花岗岩记录[J]. *地质学报*, 2001, 75(4): 485-497.
- [20] 王守旭, 张兴春, 冷成彪, 等. 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*, 2007, 26(3): 277-288.
- [21] 冷成彪, 张兴春, 王守旭, 等. 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*, 2008, 32(1): 124-130.
- [22] Qi L, Hu J, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Talanta*, 2000, 51: 507-513.
- [23] Roberts M P, Clemens J D. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids [J]. *Geology*, 1993, 21: 825-828.
- [24] Reid A, Wilson C J L, Shun L, et al. Mesozoic plutons of the Yidun Arc, SW China: U/Pb geochronology and Hf isotopic signature [J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31(1-4): 88-106.
- [25] 王守旭. 云南中甸普朗斑岩铜矿床地球化学[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2008.
- [26] 李文昌. 义敦岛弧构造演化与普朗超大型斑岩铜矿成矿模型[D]. 北京: 中国地质大学, 2007.
- [27] 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[J]. *地质学报*, 78(1): 110-120.
- [28] 曾普胜, 李文昌, 王海平, 等. 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*, 2006, 22(4): 989-1000.
- [29] 芮宗瑶, 侯增谦, 李光明. 冈底斯斑岩铜矿成矿模式[J]. *地质论评*, 2006a, 52(4): 459-466.
- [30] 芮宗瑶, 张洪涛, 陈仁义, 等. 斑岩铜矿研究中若干问题探讨[J]. *矿床地质*, 2006b, 25(4): 491-500.
- [31] Sillitoe R H. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits [J]. *Economic Geology*, 1972, 67(2): 184-197.
- [32] Sillitoe R H. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region [J].

Australian Journal of Earth Sciences , 1997 , 44: 373-388.

- [33] Sawkins F J. Sulfide ore deposits in relation to plate tectonics [J]. *The Journal of Geology* , 1972 , 80(4) : 377-397.
- [34] 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]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2009.
- [35] Sun S S. McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society , London , Special Publications* , 1989 , 42: 313-345.
- [36] Nelson D R. Isotopic characteristics of potassic rock: Evidence for the involvement of subducted sediments in magma genesis [J]. *Lithos* , 1992 , 28 (3-6) : 403-420.

Geochemical Characteristics of the Langdu High-K Intermediate-Acid Intrusive Rocks in the Zhongdian Area , Northwest Yunnan Province , P. R. China

REN Tao^{1,2} , ZHONG Hong¹ , CHEN Jin-fa³ , ZHU Wei-guang¹ , ZHANG Xing-chun¹

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry , Institute of Geochemistry , Chinese Academy of Sciences , Guiyang 550002 , China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100039 , China;

3. Guizhou Province Geological Mineral Resources Exploitation Stock Co. , Ltd , Guiyang 550004 , China)

Abstract: The Langdu high-K calc-alkaline intrusive rocks in the Zhongdian area of northwestern Yunnan Province , China are spatially associated with the Langdu skarn copper deposit. These rocks consist mainly of quartz-diorite porphyry , granodiorite and quartz-monzonite porphyry. The K_2O content of majority is higher than 3% , and in the K_2O-SiO_2 diagram , all the samples fall into the high-K calc alkaline to shoshonitic fields. They are enriched in LREE and depleted in HREE (La/Yb)_N = 14.3 ~ 21.2) , and show negative to no Eu anomaly ($\delta Eu = 0.77 \sim 1.00$) . In the primitive-mantle normalized spidergram , they are enriched in K , Rb , Sr , Ba , but depleted Nb , Ta and Ti. The samples have relatively enriched Sr-Nd isotopic compositions with ($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i ratios from 0.7044 to 0.7069 and $\epsilon_{Nd}(t)$ values from -2.8 to -2.2. In combination of the above elemental and isotopic characteristics , it is suggested that the Langdu intrusives were derived from a metasomatized mantle source generated by subduction-released fluids and involvement of crustal material , which are related to subduction of the Garze-Litang Ocean.

Key words: intrusive rock; geochemistry; Sr-Nd isotopes; intrusion; Langdu; Yunnan Province