

# 老挝中北部花岗岩地球化学特征及其地质意义

贾润幸<sup>1,2,3</sup>, 方维萱<sup>1,2</sup>, 胡瑞忠<sup>1</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学重点研究实验室, 贵州 贵阳 550002;  
2. 北京矿产地质研究院, 北京 100012;  
3. 中国有色金属地质资源科技有限公司, 北京 100012

**【摘要】** 老挝 NM 矿区位于中北部长山 (Truong Son) 岩浆-构造内。在二叠-三叠纪的印支运动期间, Sibumasu 板块沿 Nan-Uttaradit 缝合线与印支板块拼接后, 在印支板块的东部形成了北西向右旋的长山 (Truong Son) 岩浆-构造剪切带。NM 矿区的花岗岩可分为中粗粒花岗岩、斑状花岗岩和细粒花岗岩。本区不同类型花岗岩的地球化学特征显示其 ACNK 值多介于 0.9~1.1 之间, 为高钾钙碱性花岗岩; 微量元素中多富集 Cs, Rb, Th, U, K 而相对亏损 Ba, Sr 等大离子亲石元素, 高场强元素分异明显, Nb, P, Ti 表现出明显的负异常; 稀土元素相对富集轻稀土, 轻稀土元素分馏程度高而重稀土元素分馏程度不明显, 钨具中等或明显的负异常, 上述特征表明本区不同类型花岗岩的物质来源相似。结合本区的大地构造特征和花岗岩的地球化学特征来看, 本区花岗岩可能形成于印支碰撞造山后期的挤压-剪切环境。同时岩浆在从中粗粒花岗岩向斑状花岗岩和细粒花岗岩的结晶演化过程中, TFe, TiO<sub>2</sub>, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O 的含量逐渐降低, 而 SiO<sub>2</sub> 和 K<sub>2</sub>O 的含量相对增加, Fe, Cu, Zn (Pb) 等矿化主要与其中的斑状花岗岩的关系较为密切。

**【关键词】** 地球化学; 花岗岩; 印支运动; 老挝  
中图分类号: P595; P588.12<sup>+</sup>1 文献标识码: A  
文章编号: 1001-6872(2011)03-0082-08

老挝与中国云南陆地相连, 在构造上与中国三江造山带有着密切的联系<sup>[1]</sup>。横跨老挝-越南的长山 (Truong Son) 成矿带是该区最为重要的内生金属矿床成矿带, 近十几年来在该成矿带老挝境内已

先后发现和评价了富开和赛奔等世界超大型斑岩铜金矿床, 使该地区一度成为世界找矿热点。研究表明, 长山 (Truong Son) 成矿带与印支造山运动有着直接的关系, 老挝境内最高峰-比亚山 (Phou Bia)

收稿日期: 2010-12-28; 改回日期: 2011-06-22

基金项目: 中国科学院地球化学研究所资助项目; 有色金属矿产地质调查研究中心创新项目

作者简介: 贾润幸, 男, 41岁, 高级工程师(博士), 岩石学、矿床学专业, 研究方向: 岩石学、矿床学及地球化学。

则为该成矿带中印支期形成较大的复式花岗岩基。老挝 NM 铜多金属矿区位于 Phou Bia 花岗岩基东南侧,西距富开铜金矿床约 40 km(图 1)。前人对该区岩浆岩进行过一些基础,尚待深入研究<sup>[2]</sup>。本次研究着重从岩石矿物组合、地球化学特征对 NM 矿区不同类型的花岗岩进行,初步探讨了不同类型花岗岩体分布规律、形成的构造环境及其与成矿的关系,目的在于为该地区的进一步找矿工作提供理论依据。

### 1 地质概况

老挝 NM 铜多金属矿区位于北西向长山(Truong Son)岩浆构造带和北东向琅布拉邦(Louangphabang)岩浆构造带的交汇部位附近。矿区南部出露的地层主要为下石炭纪碳酸盐岩和侏罗纪粉砂岩。伴随着印支期黑云母花岗岩的侵入,在矿区南部形成了近东西向的赛松奔大断裂,区内可见几组近东西向(F1 和 F2)和北东向(F3 和 F4)的次级断裂。矿(化)体产于花岗岩与石炭纪碳酸盐岩的接触带,呈近东西向展布,从北到南可划分为三条矿化带和 4 个矿体。I 号铜矿体产于接触带花岗岩北侧,呈不规则透镜体状;II-1 铜锌(铅)矿体位于接触带的东段,呈透镜状、多层状;II-2 铜铁矿体位于接触带的西段,矿体顶盘多已风化剥蚀掉,部分矿体呈氧化-半氧化透镜状、似层状;III 号铜锌矿体产于南部碳酸盐岩层间裂隙,呈脉状顺层产出(图 2)。

### 2 样品采集与分析

为了研究本区花岗岩的地质-地球化学特征,分别对区内中-粗粒花岗岩、斑状花岗岩和细粒花岗岩进行了有代表性的样品采集,岩石样品主要为未风化且没有蚀变的新鲜露头,样品重量约 500 g 左右,切片磨制电子探

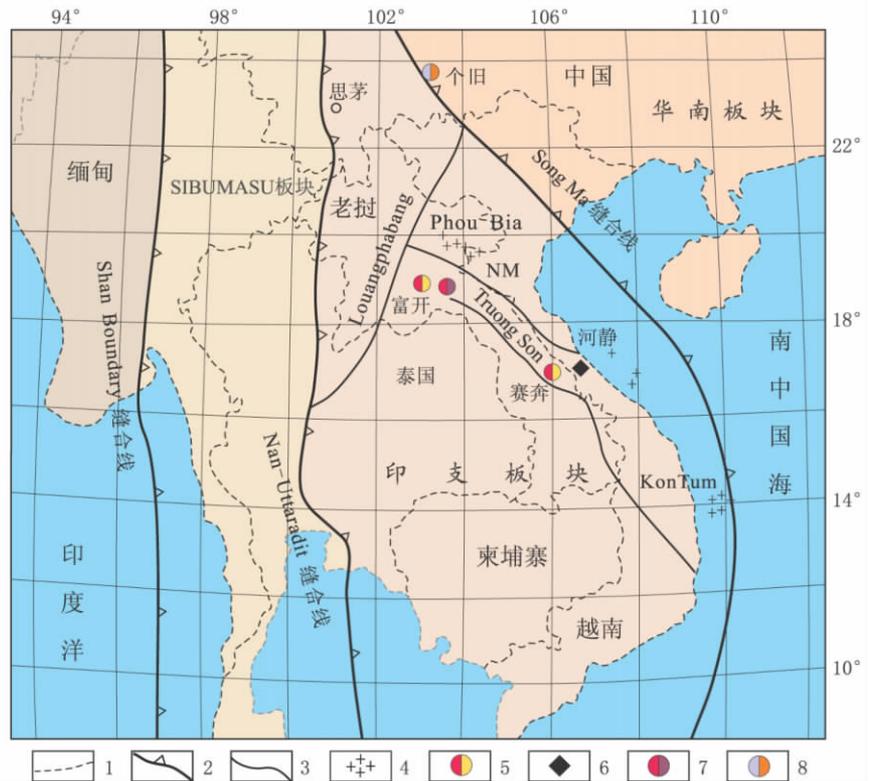


图 1 老挝 NM 矿区大地构造位置图(据李方夏等<sup>①</sup>,1995 修改)

1. 国界线; 2. 板块间缝合线; 3. 构造-岩浆带; 4. 花岗岩出露区; 5. 铜金矿; 6. 铁矿; 7. 铜锌矿; 8. 锡铜矿

Fig. 1 The tectonic location of the NM deposit in Laos

片后,其余粉碎至 200 目后送至核工业地质分析测试研究中心对其进行主量元素和微量元素的分析,主量元素采用 X 荧光光谱分析方法,微量元素采用等离子质谱分析方法(ICP-MS),分析结果见表 1。

### 3 花岗岩矿物-地球化学特征

#### 3.1 花岗岩矿物组合特征

本区的花岗岩主要为黑云母花岗岩,按照矿物

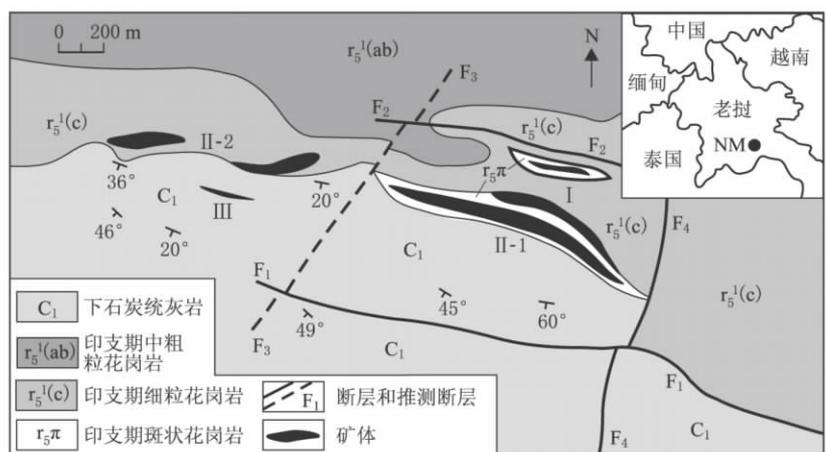


图 2 老挝 NM 矿区地质略图

Fig. 2 Geological sketch map for the NM ore deposit in Laos

①李方夏,等. 东南亚地质矿产与矿业经济,1995.

表 1 老挝 NM 矿区花岗岩主量元素  $w(B)/\%$  和微量元素  $w(B)/10^{-6}$  分析结果  
 Table 1 Analysis result of major elements (in percentage) and trace elements (in  $[ \times 10^{-6} ]$ ) for different granites in the NM ore deposit

类型	中粗粒花岗岩						细粒花岗岩			斑状花岗岩				
	G10	HB2401	G8	G9	E6B2	均值	HB1903	G6	均值	BLD2	G1	G2	G4	均值
SiO <sub>2</sub>	75.88	75.3	74.86	74.59	75.12	75.15	76.6	77.19	76.9	75.29	74.61	77.03	74.51	75.36
TiO <sub>2</sub>	0.21	0.17	0.21	0.21	0.1	0.18	0.09	0.11	0.1	0.21	0.2	0.2	0.19	0.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.46	11.99	12.31	12.14	12.07	11.99	11.45	11.54	11.5	11.91	12.41	11.59	13.17	12.27
TFe	2.85	2.6	2.6	2.8	2.01	2.57	2.22	1.75	1.99	2.88	2.5	2.21	2.03	2.41
MnO	0.08	0.07	0.06	0.07	0.05	0.06	0.06	0.04	0.05	0.07	0.1	0.04	0.05	0.07
MgO	0.78	0.28	0.34	0.75	0.18	0.47	0.11	0.11	0.11	0.34	0.53	0.23	0.29	0.35
CaO	1.24	0.7	0.78	0.83	1.72	1.05	1.02	0.41	0.72	0.85	1.79	0.33	0.29	0.82
Na <sub>2</sub> O	3.51	3.55	4.07	4.13	2.87	3.63	3.52	2.71	3.12	3.65	4.05	3.49	2.87	3.52
K <sub>2</sub> O	3.31	3.94	3.88	3.79	4.35	3.85	4.61	5.62	5.12	4.02	2.62	4.46	4.69	3.95
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06	0.04	0.04	0.06	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02	0.05	0.05	0.03	0.04	0.04
烧失量	0.44	1.2	0.68	0.42	1.34	0.82	0.2	0.42	0.31	0.52	0.94	0.28	1.68	0.86
总量	99.81	99.83	99.83	99.79	99.83	99.82	99.9	99.92	99.91	99.79	99.8	99.89	99.81	99.82
Li	9.59	16.4	17.4	18.4	3.79	13.1	3.66	4.55	4.1	16.6	19.9	14.7	10.8	15.5
Be	2.6	2.39	3.21	3.17	3.26	2.93	4.25	2.66	3.46	2.21	5.04	2.07	3.33	3.16
Sc	3.14	3.18	3.39	3.49	4	3.44	2.4	3.24	2.82	2.89	3.23	3.37	4.47	3.49
V	9.74	12.4	13.2	14.8	5.29	11.09	3.94	4.32	4.13	11.6	11.1	10.5	10.1	10.8
Cr	3.59	3.61	4.09	4.94	2.54	3.75	2.56	2.8	2.68	3.69	3.9	8.11	4.25	4.99
Co	1.33	1.41	2.16	2.05	0.98	1.59	0.97	0.69	0.63	1.72	1.97	1.16	1.64	1.62
Ni	1.64	1.17	1.96	2.16	1.08	1.6	0.99	1.46	1.22	1.5	3.11	1.58	1.76	1.99
Cu	20.1	86.4	8.02	18.6	9.43	28.5	7.92	169	88.5	157	379	42.7	52.1	158
Zn	31.3	117	37.2	31.3	38.1	51	27.7	131	79.4	41.9	694	42.4	197	244
Ga	15.1	14.1	17.5	17.5	16.5	16.1	17.1	16.9	17	13.5	16.1	13.3	19.9	15.7
As	2.69	2.79	3.06	3.33	2.67	2.91	3.84	3.74	3.79	1.82	3.84	3.44	4.5	3.4
Se	0.37	0.26	0.32	0.44	0.29	0.34	0.34	0.58	0.46	0.21	0.57	0.37	0.64	0.45
Rb	109	153	139	143	187	146	151	200	176	130	108	155	161	139
Sr	177	101	173	133	87.8	134	32.1	98.4	65.3	135	421	64.2	64.1	171
Y	11.7	19.4	13.7	14.4	15.3	14.9	13.2	21.1	17.2	14	25.8	14.3	21.7	19
Zr	86.1	62.8	72.5	73.6	78.6	74.7	129	123	126	61.3	75.7	80.7	167	96.2
Nb	14.5	5.13	13.5	13.8	15.1	12.4	18.6	16.5	17.6	4.7	13.9	12.2	16.4	11.8
Mo	85	1.19	1.12	1.43	1.01	18	0.7	1.32	1.01	22.6	2.65	0.98	0.59	6.71
Cd	0.23	0.65	0.08	0.11	0.11	0.23	0.17	0.74	0.46	0.33	1.01	0.11	0.28	0.43
In	0.03	0.02	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.08	0.05	0.03	0.04	0.05
Sn	1.29	1.43	0.59	3.11	1.22	1.53	1.15	0.62	0.88	4.41	1.52	2.27	1.06	2.32
Sb	0.2	0.09	0.17	0.17	0.03	0.13	0.06	0.07	0.07	0.14	0.06	0.04	0.01	0.06
Cs	2.56	4.09	4.62	3.56	3.07	3.58	2.73	3.09	2.91	2.22	4.14	2.59	3.03	3
Ba	410	700	651	645	761	633	92.6	318	205	660	597	658	456	593
Hf	3.35	2.31	2.7	2.57	3.13	2.81	4.56	4.58	4.57	2.11	2.47	2.66	5.58	3.21
Ta	1.71	1.88	1.48	1.39	1.85	1.66	1.73	1.99	1.86	1.45	1.36	1.29	1.95	1.51
W	1.53	0.88	1.52	1.73	3.81	1.89	1.41	1.42	1.42	3.46	1.15	1.77	1.58	1.99
Tl	0.41	0.65	0.64	0.73	0.93	0.67	0.43	0.67	0.55	0.52	0.36	0.66	0.57	0.53
Pb	6.34	19.7	14.2	12.2	26.4	15.8	14.8	24.9	19.9	11.9	65.3	16.8	78.7	43.2
Bi	0.08	1.33	0.15	0.18	0.46	0.44	0.07	0.2	0.14	0.91	0.22	0.16	0.16	0.36
Th	18.2	18.1	20.4	17.8	23	19.5	30.3	30.7	30.5	20.1	16	18.3	30.4	21.2
U	5.43	3.17	3.11	3.8	4.02	3.91	5.04	7.75	6.4	3.71	3.2	4.19	4.94	4.01
Ge	1.21	1.1	1.14	1.33	1.22	1.2	1.19	1.75	1.47	0.94	1.9	1.29	2.84	1.74
La	27.8	40.4	28.6	30.7	38.8	33.3	25.7	43.3	34.5	29.8	40.1	43.2	59.4	43.1
Ce	47.2	53.7	44	47.6	71.6	52.8	49.2	67.8	58.5	40	56.3	48.3	81.9	56.6
Pr	4.59	6.6	4.44	4.98	6.8	5.48	5.33	7.82	6.58	4.69	8.12	6.36	11.3	7.62
Nd	14.6	20.5	13.8	16.1	22.5	17.5	15.7	24.1	19.9	15.2	26.6	19.7	35.5	24.3
Sm	2.38	3.73	2.38	2.74	4.02	3.05	2.87	4.06	3.47	2.58	4.54	2.76	6.02	3.98
Eu	0.26	0.57	0.51	0.53	0.45	0.47	0.19	0.44	0.31	0.47	0.77	0.46	0.65	0.59
Gd	2.25	3.62	2.4	2.73	3.58	2.92	2.42	3.75	3.09	2.62	4.49	2.85	5.14	3.78
Tb	0.35	0.52	0.39	0.41	0.5	0.43	0.43	0.63	0.53	0.41	0.7	0.44	0.83	0.59
Dy	2.14	3.33	2.44	2.46	3.06	2.69	2.53	4.21	3.37	2.53	4.16	2.65	4.68	3.51
Ho	0.42	0.68	0.5	0.52	0.6	0.54	0.53	0.83	0.68	0.51	0.83	0.56	0.89	0.7
Er	1.37	2.1	1.54	1.56	1.82	1.68	1.63	2.71	2.17	1.63	2.5	1.71	2.64	2.12
Tm	0.23	0.31	0.24	0.24	0.28	0.26	0.27	0.43	0.35	0.25	0.39	0.27	0.4	0.33
Yb	1.64	2.11	1.64	1.7	1.93	1.8	1.95	3.09	2.52	1.79	2.44	1.84	2.73	2.2
Lu	0.26	0.31	0.27	0.28	0.29	0.28	0.29	0.49	0.39	0.27	0.38	0.28	0.42	0.34
ΣREE	105.49	138.49	103.15	112.55	156.23	123	109.04	163.66	136	102.75	152.31	131.38	212.49	150
ΣLREE	96.83	125.5	93.73	102.65	144.17	113	98.99	147.52	123	92.74	136.43	120.78	194.77	136
ΣHREE	8.66	12.99	9.41	9.9	12.06	10.6	10.05	16.15	13.1	10.01	15.89	10.6	17.72	13.6
ΣCe/ΣY	11.19	9.66	9.96	10.37	11.95	10.6	9.85	9.14	9.49	9.27	8.59	11.4	10.99	10.1
(La/Yb) <sub>N</sub>	11.43	12.91	11.76	12.18	13.55	12.4	8.89	9.45	9.17	11.22	11.08	15.83	14.67	13.2
(La/Sm) <sub>N</sub>	7.35	6.81	7.56	7.05	6.07	6.97	5.63	6.71	6.17	7.27	5.56	9.85	6.21	7.22
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	1.11	1.38	1.18	1.3	1.5	1.29	1	0.98	0.99	1.18	1.48	1.25	1.52	1.36
δEu	0.35	0.48	0.66	0.59	0.36	0.49	0.22	0.34	0.28	0.56	0.52	0.5	0.36	0.48
ANK	1.22	1.19	1.13	1.11	1.28	1.19	1.06	1.09	1.08	1.15	1.31	1.1	1.34	1.22
ACNK	0.99	1.05	1	0.98	0.96	1	0.91	1.02	0.96	1	0.97	1.04	1.28	1.07

注: ANK=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)(摩尔分数); ACNK=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)(摩尔分数)

粒度的不同可划分为三类,即中粗粒花岗岩、斑状花岗岩和细粒花岗岩。

中粗粒花岗岩分布于矿区的北部,岩石呈浅肉红色,风化后呈米黄色,似斑状结构,粒度一般 1 mm~7 mm,主要由钾长石、斜长石、石英和黑云母组成。钾长石主要为条纹长石和正长石,不规则-半自形粒状,含量 30%~40%;斜长石主要为奥长石-中长石,自形-半自形粒状,具纳长石双晶,少数可见环带状,弱绢云母化,含量 25%~35%;石英他形粒状,含量 30%~35%;黑云母为片状,多绿泥石或氧化,含量 1%~5%。此外还可见到少量的磁铁矿、褐铁矿、榍石和锆石等。

斑状花岗岩多分布于矿体附近。岩石地表呈灰白色-灰紫色,斑状结构,斑晶主要由石英、钾长石和少量斜长石组成,粒度 3 mm~8 mm,少数石英达到 10 mm。基质由石英、钾长石和斜长石组成,粒度 0.5 mm~1 mm。钾长石由正长石、微斜长石和条纹长石组成,含量 30%~45%;斜长石为奥-中长石,多粘土化或绢云母化,含量 20%~30%;石英为他形粒状,含量 30%~35%;此外可见少量的黑云母、绿帘石和磁铁矿等。

细粒花岗岩分布于矿区的中南部,与南部的碳酸岩直接接触。岩石多呈灰白色,花岗结构,粒度 0.3 mm~2 mm,主要由钾长石、斜长石、石英和黑云母组成。钾长石主要为条纹长石和正长石,常与石英组成微文象结构,含量 50%~60%;斜长石主要为奥长石,与钾长石伴生,具纳长石双晶,含量 5%~10%;石英他形粒状,含量 30%~45%;黑云母为小片状,少量残存为蛭石交代,含量 1%左右。此外还可见到少量的磁铁矿、绿帘石等。

### 3.2 花岗岩地球化学特征

3.2.1 主量元素 从表 1 中可以看出本区中粗粒花岗岩、斑状花岗岩和细粒花岗岩中  $w(\text{SiO}_2)$  变化范围为 74.51%~77.19%; $w(\text{TiO}_2)$  变化范围为 0.09%~0.21%; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  变化范围为 11.45%~13.17%; $w(\text{TFe})$  变化范围为 1.75%~2.88%; $w(\text{MnO})$  变化范围为 0.04%~0.10%; $w(\text{MgO})$  变化范围为 0.11%~0.78%; $w(\text{CaO})$  变化范围为 0.29%~1.79%; $w(\text{K}_2\text{O})$  变化范围为 2.62%~5.62%; $w(\text{Na}_2\text{O})$  变化范围为 2.71%~4.13%。 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$  变化范围 0.02%~0.06%。

本区中粗粒花岗岩、斑状花岗岩和细粒花岗岩的化学成分较为接近,在  $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-w(\text{SiO}_2)$  图解(图 3)中全部落在花岗岩区;在  $w(\text{K}_2\text{O})-w(\text{SiO}_2)$  图解(图 4)上来看,样品投影点主要落入高

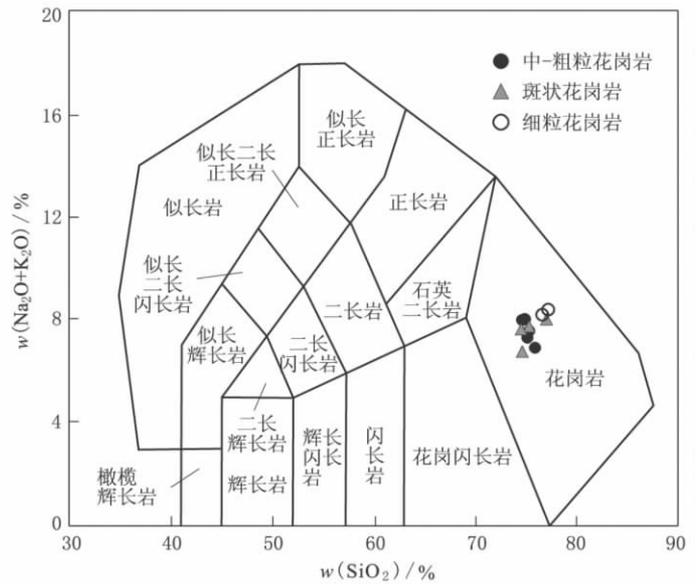


图 3 老挝 NM 花岗岩类  $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-w(\text{SiO}_2)$  分类图(底图据 Cox C G et al.,1979<sup>[3]</sup>)  
Fig. 3  $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-w(\text{SiO}_2)$  classification for the NM granites in Laos

钾钙碱性系列范围;在 ANK-ACNK 图解(图 5)中花岗岩样品投影点主要落入弱过铝花岗岩带内,多数样品的 ACNK 值介于 0.9~1.1 之间。对比不同类型花岗岩中的化学成分,中粗粒花岗岩中的 TFe、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  的含量明显高于细粒花岗岩,后者中  $\text{SiO}_2$  和  $\text{K}_2\text{O}$  的含量明显高于前者,斑状花岗岩的成分则介于两者之间,表明岩浆在从中粗粒花岗岩向斑状花岗岩和细粒花岗岩的演化过程中,TFe、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  的含量逐渐降低,而  $\text{SiO}_2$  和  $\text{K}_2\text{O}$  的含量相对增加,这可能主要与后期的钾化作用有关,在细粒花岗岩中的钾长石含量明显增加。

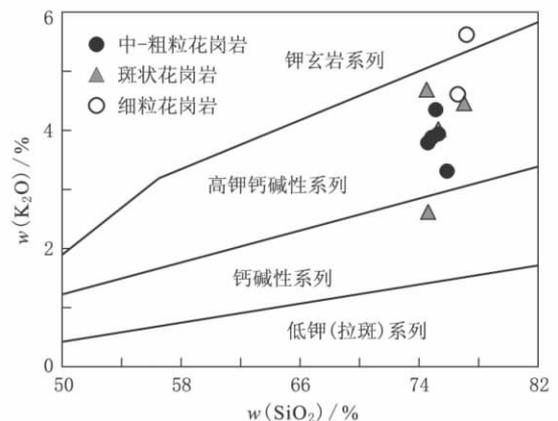


图 4 老挝 NM 花岗岩  $w(\text{K}_2\text{O})-w(\text{SiO}_2)$  图解(底图据 Rickwood P C,1989<sup>[4]</sup>)  
Fig. 4  $w(\text{K}_2\text{O})-w(\text{SiO}_2)$  diagram for the granites in the NM ore deposit

3.2.2 微量元素 采用原始地幔<sup>[6]</sup>对本区的花岗岩进行标准化配分(图 6),从图 6 可看出,本区中粗粒花岗岩、斑状花岗岩和细粒花岗岩花岗岩中均富

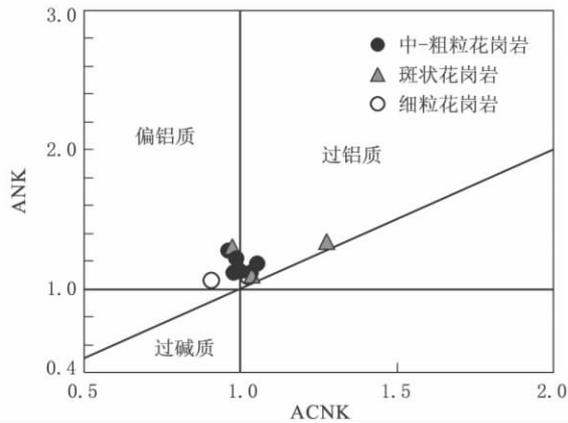


图 5 老挝 NM 花岗岩 ANK-ACNK 图解(底图据 Pearce J A,1984<sup>[5]</sup>)  
Fig. 5 ANK-ACNK diagram for granites in the NM ore deposit

集 Cs-Rb-Th-U-K 而相对亏损 Ba-Sr 等大离子亲石元素,高场强元素分异明显,Nb-P-Ti 表现出明显的负异常,表明上述三者形成过程中的物质来源较为相似。从图 7 可看出,中粗粒花岗岩和斑状花岗岩中的 V-Cr-Co-Mo-Sn-Bi-Ti 的平均含量要高于细粒花岗岩,而细粒花岗岩中的 Cu-Pb-Zn 平均含量大于中粗粒花岗岩,小于斑状花岗岩中的含量。中粗粒花岗岩中的 Mo 平均质量分数为  $18 \times 10^{-6}$ ,最高达  $85 \times 10^{-6}$ ;斑状花岗岩中的 Cu,Pb,Zn 平均质量分数分别为  $158 \times 10^{-6}$ ,  $43.2 \times 10^{-6}$  和  $244 \times 10^{-6}$ ,表明在岩浆的结晶分异过程中,金属元素的含量也发生相应的变化,中粗粒花岗岩对 Mo 的成矿较为有利,而斑状花岗岩对 Cu-Pb-Zn 的成矿较为有利。

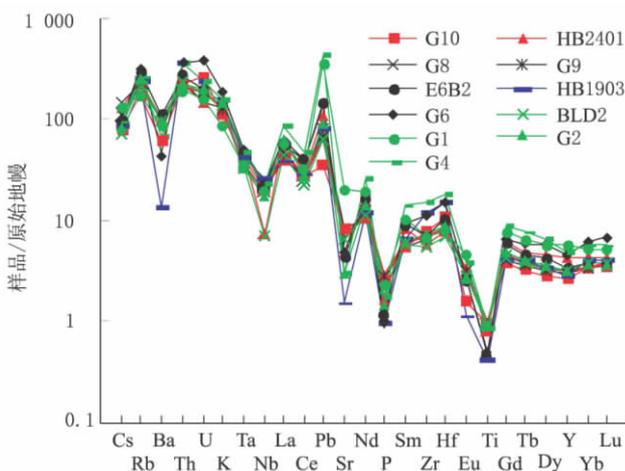


图 6 老挝 NM 矿区不同类型花岗岩金属元素变化曲线  
Fig. 6 The variation graph of metal elements for different types of granites in the NM ore deposit

3.2.3 稀土元素 采用球粒陨石<sup>[7]</sup>为标准对本区的花岗岩作稀土配分曲线土图(图 8)。中粗粒花岗岩中稀土总量  $\Sigma REE$  变化范围为  $103 \times 10^{-6} \sim 156$

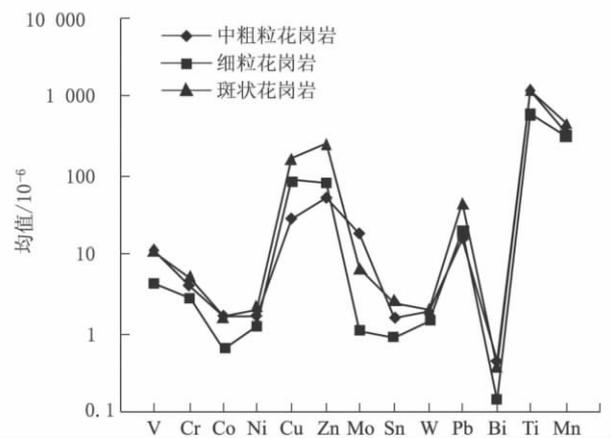


图 7 老挝 NM 矿区花岗岩微量元素蜘蛛图解  
Fig. 7 Spider diagram of primitive mantle normalized trace elements for different granites in the NM ore deposit

$\times 10^{-6}$ ,平均为  $123 \times 10^{-6}$ ;  $\Sigma Ce/\Sigma Y$  比值变化范围为 9.7~12.0,平均为 10.6;  $(La/Yb)_N$  比值变化范围为 11.4~13.6,平均为 12.4。  $(La/Sm)_N$  比值变化范围为 6.07~7.56,平均为 6.97,轻稀土分馏程度相对明显,  $(Gd/Yb)_N$  比值变化范围为 1.11~1.50,平均为 1.29,重稀土分馏程度差异不明显。钕具中等的负异常,  $\delta Eu$  变化范围为 0.35~0.66,平均为 0.49。

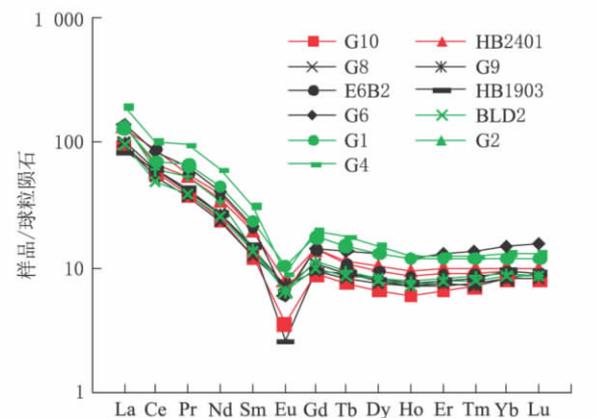


图 8 老挝 NM 矿区花岗岩稀土元素配分曲线图  
Fig. 8 Chondrite-normalized REE distribution patterns of different granites in the NM ore deposit

斑状花岗岩中稀土总量  $\Sigma REE$  变化范围为  $103 \times 10^{-6} \sim 212 \times 10^{-6}$ ,平均为  $150 \times 10^{-6}$ ;  $\Sigma Ce/\Sigma Y$  比值变化范围为 8.59~11.4,平均为 10.1;  $(La/Yb)_N$  比值变化范围为 11.1~15.8,平均为 13.2。  $(La/Sm)_N$  比值变化范围为 5.56~9.85,比值平均为 7.22,轻稀土分馏程度相对明显;  $(Gd/Yb)_N$  比值变化范围为 1.18~1.52,平均为 1.36,重稀土分馏程度差异不明显。钕具中等的负异常,  $\delta Eu$  变化范围为 0.36~0.56,平均为 0.48。

细粒花岗岩中稀土总量  $\Sigma\text{REE}$  平均为  $136 \times 10^{-6}$ ;  $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$  比值平均为 9.49;  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  比值平均为 9.17。  $(\text{La}/\text{Sm})_N$  比值平均为 6.17, 轻稀土元素分馏程度相对明显,  $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$  比值平均为 0.99, 重稀土元素分馏程度差异不明显。 钕具有明显的负异常,  $\delta\text{Eu}$  变化范围为 0.22~0.34,  $\delta\text{Eu}$  平均为 0.28, 稀土元素配分曲线呈特征的“V”字形。

从上述稀土元素的特征参数来看(图 9), 中粗粒花岗岩、斑状花岗岩和细粒花岗岩中的稀土元素特征较为相似, 均相对富集轻稀土, 轻稀土元素分馏程度明显而重稀土元素分馏程度不明显。 不同之处是斑状花岗岩中的稀土总量略高于中粗粒花岗岩和细粒花岗岩, 而细粒花岗岩中的  $\delta\text{Eu}$  负异常明显低于中粗粒花岗岩和斑状花岗岩。 上述特征表明斑状花岗岩的分异程度相对较好, 对成矿更为有利。

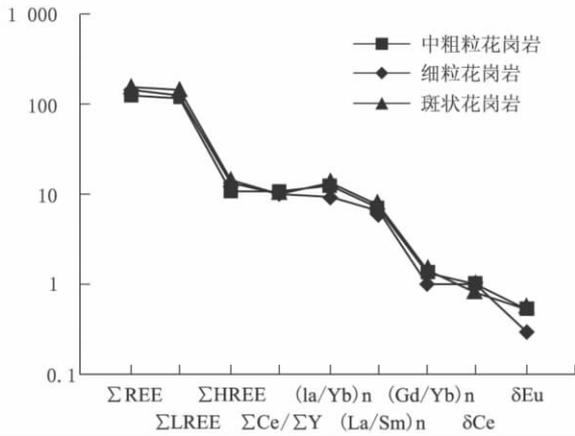


图 9 老挝花岗岩稀土元素特征参数变化曲线图  
Fig. 9 The variation graph of REE parameters of different type granites in the NM ore deposit

## 4 讨论

### 4.1 花岗岩形成的地质背景

研究表明, 在石炭世早期, 印支板块和华南板块沿 Song Ma 缝合线合并形成东亚大陆; 在二叠-三叠纪的印支运动期间, Sibumasu 板块沿 Nan-Uttaradit 缝合线与印支板块合并<sup>[8]</sup>。 印支运动最终完成了华北板块与西伯利亚板块、扬子板块与华北板块、华南板块与扬子板块、印支板块与扬子板块等的碰撞, 使其拼合为一个整体进而构成欧亚板块构造的一部分, 因此, 印支运动是亚洲乃至全球一次极重要的构造运动<sup>[9]</sup>。

印支运动在老挝和越南的中北部形成了几组北西向的岩浆-构造活动带, 其中包括横跨越南-老挝的北西向长山(Truong Son)右旋剪切带。 在该带南部位于越南境内 Kon Tum 山区中的 Kan Nak 杂

岩体中可见到麻粒岩相高温变质岩, 从其中代表初始岩浆-紫苏花岗岩中黑云母测得的  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  法年龄为 245 Ma<sup>[10]</sup>。 这一结果与印支运动普遍认可的 240 Ma~250 Ma 接近, 反映了在印支运动的初期地壳深部曾经历过强烈的高温变质作用。 老挝 NM 矿区位于长山(Truong Son)岩浆-构造带的中北部, 该区的花岗岩总体上为高钾钙碱性花岗岩。 Roberts 和 Clemens(1993)认为在一个区域中高钾钙碱性岩石的存在就意味着在深部有足够规模的适当的安山质源<sup>[11]</sup>。 Barbarin(1999)认为钙碱性花岗岩通常与地壳和地幔物质的混合有关<sup>[12]</sup>。 本区高钾钙碱性花岗岩中均富集 Cs-Rb-Th-U-K 而相对亏损 Ba-Sr 等大离子亲石元素(LILE), 高场强元素(HFSE)分异明显, Nb-P-Ti 表现出明显的负异常, 与我国西藏羌塘北部一带高钾钙碱性花岗岩的地球化学特征相似<sup>[13]</sup>, 这种富集 Rb-Th 和亏损 Ba-Sr-Ti 的特征, 暗示它们形成一种成熟度较高的与俯冲有关的构造环境<sup>[14]</sup>。 张旗等(1999)把岛弧火山岩中 LILE 丰度高,  $w(\text{Th}) > w(\text{Ta})$ , 及 Nb, Ta 相对于 Th, La 亏损的地球化学特征归因为有来自消减带物质的加入, 表明它们的源区岩石在一定程度上受到了壳-幔混合作用的影响<sup>[15]</sup>。 研究表明, 产于拉张环境和挤压环境中的花岗岩稀土元素配分模式存在明显区别, 拉张过渡壳中花岗岩一般呈 Eu 的正异常或无大的异常, Gd/Lu 比值一般在 15~20 之间; 而挤压型则呈 Eu 的负异常, Gd/Lu 比值一般在 8~12 左右<sup>[16]</sup>, 从本区不同类型花岗岩稀土元素的特征来看, Eu 均具明显负异常, Gd/Lu 平均比值为 8~11, 显然与挤压的构造环境有关。

从本区花岗岩样品在  $w(\text{Rb})-w(\text{Y}+\text{Nb})$  图解(图 10)上看, 主要投影在后碰撞花岗岩带中, 这种

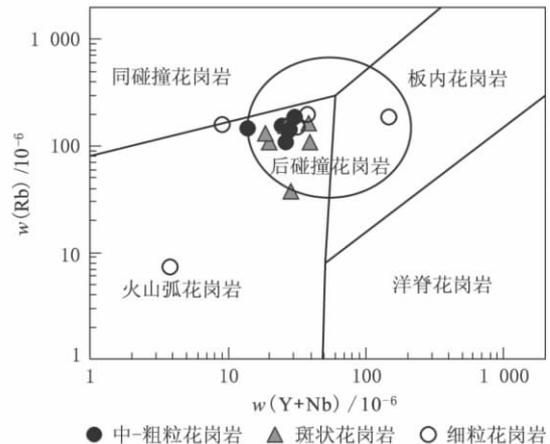


图 10 老挝 NM 花岗岩  $w(\text{Rb})-w(\text{Y}+\text{Nb})$  图解(底图据 Pearce J A, 1996<sup>[18]</sup>)  
Fig. 10  $w(\text{Rb})-w(\text{Y}+\text{Nb})$  diagram of granites in NM deposit

后碰撞的岩浆作用通常具有以下共同特点:(1)在成份上主要是富钾的,特别是高钾钙碱性岩浆最为发育,并含有少量的橄榄玄粗岩;(2)后碰撞岩浆岩作用与沿剪切带的大规模水平运动有关;(3)源区含有大量新生的成分、地幔的或新形成的火成岩或沉积特征的地壳<sup>[17]</sup>。

本区花岗岩的形成无疑与印支板块和 Sibumasu 板块及华南板块的相互碰撞有关。石炭世早期,印支板块沿 Song Ma 缝合线与华南板块中的洋壳发生碰撞后,二叠-三叠纪期间 Sibumasu 板块与印支板块的偏向碰撞,在东印支板块形成了一组北西向的构造剪切带,并诱发了深部火山弧安山质源岩的熔融和侵入。所以结合本区的地质构造背景,老挝 NM 矿区的花岗岩应为形成于印支碰撞造山后期的挤压剪切环境。

#### 4.2 本区岩浆演化及其成矿性

花岗岩的成因、分类、演化及其成矿性一直是岩石学界研究和探讨的热点问题<sup>[19]</sup>,花岗岩对成矿作用的影响可分为两种不同的意见,一种观点强调源岩的控制意义;另一种观点则强调岩浆的地球化学演化趋势<sup>[20]</sup>。关于花岗岩的成矿作用,前人已做了大量的研究<sup>[21]</sup>,这种与成矿有关的高程度演化的强过铝质浅色花岗岩中的稀土元素多具有明显的四分组效应<sup>[22]</sup>。随着对花岗岩研究的不断深入,I型花岗岩的成矿作用也越来越引起人们的重视<sup>[23]</sup>。王德滋(1999)认为I型花岗岩和S型花岗岩分布于不同的构造环境,具有不同的成矿专属性,I型花岗岩与 Au-Cu-Mo-Pb-Zn 等成矿有关;S型花岗岩与 W-Sn-U 等成矿有关<sup>[24]</sup>。研究表明,并非所有的花岗岩都能成矿,如我国南岭地区印支期花岗岩(240 Ma~205 Ma)主要形成于碰撞及“后碰撞”(post collision)的动力学环境,但都没有造成大规模的金属成矿作用<sup>[25]</sup>。花岗岩的成矿作用除与其化学成分有关外,还与其侵位方式、结晶分异程度、围岩类型及容矿构造等地质因素有密切关系。只有部分高侵位体才能形成夕卡岩型和斑岩型矿床,其原因在于部分高侵位体富集了挥发份<sup>[26]</sup>。

从老挝 NM 矿区不同类型花岗岩的空间分布、矿物组合特征来看,在印支期岩浆的演化遵循如下的顺序,即粗粒花岗岩-斑状花岗岩-细粒花岗岩,代表了岩浆从高温到低温的演变过程,在细粒花岗岩中可见到明显的文象结构,由于温度较低,其与碳酸岩围岩之间并未发生物质交换,甚至未看到明显的

烘烤现象。本区的成矿作用主要与斑状花岗岩有关,如 I-1 和 II-1 号矿体在空间上都与斑状花岗岩直接接触,这一特征与我国个旧锡矿花岗岩的成矿特征相似<sup>[27]</sup>。

值得一提的是,包括老挝 NM 矿区在内,整个长山(Truong Son)成矿带中普遍发育有铁矿床或伴生铁矿床,如越南河静超大型铁矿(图1)、老挝富诺安铁矿等。本区岩浆早期形成的中粗粒花岗岩中黑云母等暗色矿物含量明显高于斑状花岗岩和细粒花岗岩,且主要以富 Fe 的黑云母为主,同时,在本区花岗岩与灰岩接触带形成的夕卡岩中也主要以富 Fe 的黑柱石、钙铁辉石和钙铁石榴石等矿物为主,表明与围岩发生交代作用的岩浆期后热液中富含 Fe 等物质。

在本区的花岗岩或夕卡岩中经常可见沿构造裂隙充填的后期脉体,表明本区岩浆热液活动具有多期性。Fe-Cu-Zn(Pb)等成矿元素在花岗岩与灰岩的接触带具有明显的分带现象,Fe-Cu 等元素一般分布于接触带内侧,Zn(Pb)等成矿元素一般分布于接触带外侧。此外,在该区与后期构造有关的花岗岩节理中及部分接触夕卡岩中还发现了一些 Mo 的矿化信息,结合整个长山(Truong Son)成矿带有利的地质构造背景,所以老挝 NM 矿区及其周边应具有较好的综合找矿前景。

## 5 结 论

5.1 老挝 NM 矿区的花岗岩按其空间分布和结晶粒度可分为中粗粒花岗岩、斑状花岗岩和细粒花岗岩,主要为高钾钙碱性花岗岩。不同花岗岩的地球化学特征显示它们在形成过程中的物质来源相同,岩浆在从中粗粒花岗岩向斑状花岗岩和细粒花岗岩的演化过程中,TFe, TiO<sub>2</sub>, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O 的含量逐渐降低,而 SiO<sub>2</sub> 和 K<sub>2</sub>O 的含量相对增加。

5.2 结合本区的大地构造特征和花岗岩的地球化学特征来看,本区花岗岩的形成背景可能为印支碰撞造山后期的后碰撞造山环境。

5.3 本区的花岗岩浆及其产生的热液体系具有多期活动的特征,成矿与印支期中粗粒花岗岩和细粒花岗岩的关系不大,而主要与斑状花岗岩有关。Fe-Cu-Zn(Pb)等成矿元素在花岗岩与灰岩的接触带具有明显的分带现象,Fe-Cu 等元素一般分布于内带,Zn(Pb)等成矿元素一般分布于外带。

## 参考文献

- [1] 莫宣学,邓晋福,董方浏,等.西南三江造山带火山岩-构造组合及其意义[J].高校地质学报,2001,7(2):121-138.

- [2] 朱延浙, 吴军, 严城民. 老挝岩浆岩成因[J]. 云南地质, 2007, 26(2): 189-196.
- [3] Cox C G, Bell J D, Pankhurst R J. **The interpretation of igneous rocks**[M]. London: George, Allen and Unwin, 1979, 1-450.
- [4] Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. **Lithos**, 1989, 22: 247-263.
- [5] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. **Petrol.** 1984, 25: 956-983.
- [6] Sun S-S, Mc Donough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J. **magmatism in the ocean Basins**[C]. London: Geological Society Special Publication, 1989, 313-345.
- [7] 王中刚, 于学元, 赵振华. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989, 349-353.
- [8] Fan P F. Accreted terranes and mineral deposits of Indochina[J]. **Journal of Asian Earth Sciences**, 2000, 18: 343-350.
- [9] 朱介寿, 蔡学林, 曹家敏, 等. 中国及相邻区域岩石圈结构及动力学意义[J]. 中国地质, 2006, 33(4): 794-803.
- [10] Maluski H, Lepvrier C, Leyreloup A, et al.  $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$  geochronology of the charnockites and granulites of the Kan Nack complex, Kon Tum Massif, Vietnam[J]. **Journal of Asian Earth Sciences**, 2005, 25: 653-677.
- [11] Roberts M P, Clemens J D. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids[J]. **Geology**, 1993, 21(9): 825-828.
- [12] Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. **Lithos**, 1999, 46: 605-626.
- [13] 钟华明, 童劲松, 鲁如魁, 等. 西藏日土北部松西-胜利山一带燕山期高钾钙碱性花岗岩的地球化学特征及构造环境[J]. 地质通报, 2007, 26(6): 730-738.
- [14] Brown G C, Thope R S, Webb P C. The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arc and comments on magma sources[J]. **J Geol Soc Lond**, 1984, 141: 411-426.
- [15] 张旗, 钱青, 王焰. 造山带火成岩地球化学研究[J]. 地学前缘, 1999, 6(3): 113-120.
- [16] 吴泰然. 花岗岩及其形成的大地构造环境[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1995, 31(3): 358-365.
- [17] 赵振华. 关于岩石微量元素构造环境判别图解使用中的有关问题[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 33(1): 92-103.
- [18] Pearce J A. Source and setting of granitic rocks[J]. **Episodes**, 1996, 19: 120-125.
- [19] 王涛. 花岗岩混合成因研究及大陆动力学意义[J]. 岩石学报, 2000, 16(2): 161-168.
- [20] 洪大卫. 花岗岩研究的最新进展及发展趋势[J]. 地学前缘, 1994, 1(1-2): 79-86.
- [21] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境[J]. 高校地质学报, 2008, 14(4): 510-526.
- [22] 赵振华, 熊小林, 韩小东. 花岗岩稀土元素四分组效应形成机理探讨[J]. 中国科学(D), 1999, 29(4): 331-338.
- [23] 李文昌, 莫宣学. 西南“三江”地区新生代构造及其成矿作用[J]. 云南地质, 2001, 20(4): 333-346.
- [24] 王德滋, 周金城. 我国花岗岩研究的回顾与展望[J]. 岩石学报, 1999, 15(2): 161-169.
- [25] 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景[J]. 高校地质学报, 2005, 11(3): 291-304.
- [26] 芮宗瑶, 赵一鸣, 王龙生, 等. 挥发份在夕卡岩型和斑岩型矿床形成中的作用[J]. 矿床地质, 2003, 22(1): 141-48.
- [27] 庄永秋, 王任重, 杨树培, 等. 云南个旧锡铜多金属矿床[M]. 北京: 地震出版社, 1996, 1-145.

## THE GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF GRANITES AND THEIR GEOLOGICAL IMPLICATION IN NORTH-CENTRAL REGION OF LAOS

JIA Run-xing<sup>1,2,3</sup>, FANG Wei-xuan<sup>1,2</sup>, HU Rui-zhong<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;
2. Beijing Exploration Technology Center for Mineral Resources, China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China;
3. Beijing Donia Resources Co., Ltd, Beijing 100012, China

**Abstract:** The NM deposit is located in the northwest trending magmatic-tectonic belt, north-central part of Truong Son, which was subjected to right-lateral shearing due to the collision of Sibumasu micro-continent with Indo-China micro-continent along Nan-Uttaradit suture during Permian-Triassic Period. Based on the grain size and spatial distribution, the granites in NM deposit can be classified into medium-coarse grained granite, porphyritic granite and fine grained granite respectively. The geochemical characteristics of different types of granite show that they are high-potassium, calc-alkaline granitoids with the ACNK ratios mostly ranging from 0.9 to 1.1. Trace elements of the granites show that the variety of LILE enriches in Cs, Rb, Th, U, K, while depletes in Ba and Sr, distinct fractionation of HFSE with clearly negative anomaly of Nb, P and Ti. REE analysis reveals relative high content and distinct fractionation of LREE in contrast to HREE, and moderate to sharp negative Eu anomaly. All of the geochemical features indicate that these different types of granites in NM deposit were derived from the same origin related to the special tectonic setting of post-collision volcanic arc. During the magmatic evolution process from early stage represented by medium-coarse grained granite to last stage represented by fine grained granite, the TFe, TiO<sub>2</sub>, MgO, CaO and Na<sub>2</sub>O contents in magma tend to decrease, while the SiO<sub>2</sub> and K<sub>2</sub>O contents increase gradually, and the Fe, Cu and Zn (Pb) mineralization is mainly related to the porphyritic granite.

**Key words:** geochemistry; granite; Indo-China movement; Laos

ISSN 1001-6872(2011)03-0082-08; CODEN: KUYAE2

**Synopsis of the first author:** Jia Runxing, male, 41 years old, a Senior engineer of mineralogy, petrology and geochemistry. Now he is engaged in the research of petrology, mineral deposit and geochemistry.