

文章编号:1000-4734(2003)03-0278-11

# 云南白马寨镍矿区煌斑岩地球化学

## I. 主要元素和微量元素

管涛<sup>1,2</sup>, 黄智龙<sup>1</sup>, 谢力华<sup>1</sup>, 许成<sup>1,2</sup>, 李文博<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所 矿床开放室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**云南白马寨镍矿区煌斑岩呈岩墙和岩脉穿切矿区各时代地层、基性-超基性岩和矿体, 为成矿期后产物; 采自矿区不同中段和不同产状的煌斑岩具有相似矿物组合, 岩石类型均为云煌岩; 岩石化学特征表明岩石均为钾质-富钾质钙碱性煌斑岩; 微量元素配分模式为相似的“驼峰型”, 与 MORB 相比, 富集 LILE 和 HFSE; REE 配分模式为相似的 LREE 富集型; 主要元素和微量元素与镁指数(M 值)之间存在一定的关系; 在 La-La/Sm 图中样品既有水平分布趋势、也有倾斜分布趋势。总体上, 该区煌斑岩为相同岩浆源区的产物, 源区地幔部分熔融程度和岩浆结晶分异作用对岩石主要元素和微量元素地球化学性质均有一定的影响。比较老王寨金矿区煌斑岩形成地质背景、岩石类型、主要元素和微量元素地球化学特征, 认为两地区煌斑岩地幔源区具有相同(或相似)的性质。

**关键词:**煌斑岩, 主要元素, 微量元素, 白马寨镍矿床

**中图分类号:** P588.15; P595 **文献标识码:** A

**作者简介:**管涛, 男, 1978年生, 硕士研究生, 地球化学专业。

我国西南“三江”富碱侵入岩带(亦称哀牢山—金沙江富碱侵入岩带)是世界上著名的富碱侵入岩带之一, 该富碱侵入岩带以其特殊的大地构造背景、复杂的岩石组合和丰富的矿产资源环境而吸引了许多中外地质学家的关注<sup>[1-4]</sup>。煌斑岩是“三江”富碱侵入岩带的重要组成部分, 这类岩石在该岩带中除与其它富碱侵入岩(正长岩、二长斑岩、花岗斑岩等)在时间、空间上密切共生外, 与金矿化在时间和空间上密切共生在国内外也很具典型性<sup>[5,6]</sup>。因而, 通过对这类岩石的研究, 在探讨“三江”富碱侵入岩带的大地构造环境、地幔交代作用、壳-幔相互作用、岩浆演化以及有关矿产资源的成矿作用等方面均具有重要意义。

云南白马寨镍矿床位于“三江”富碱侵入岩带的南段, 煌斑岩呈岩墙和岩脉在矿区广泛分布。由于矿区煌斑岩为成矿后期产物(煌斑岩岩墙和岩脉穿切矿体), 前人在矿床地质工作过程中没有对这类岩石进行专门研究。笔者在详细的野外地质和室内矿物学研究基础上, 对煌斑岩进行了系统的主要元素和微量元素分析, 以此探讨这类岩

石形成的大地构造背景、源区地幔特征和岩浆演化过程。由于篇幅所限, 本文主要介绍矿区煌斑岩基本地质、主要元素和微量元素特征, 进而总结了岩石的成因信息。

## 1 地质概况

白马寨镍矿区位于哀牢山断裂带南段(图1)。矿区出露地层为一套巨厚的下古生界奥陶系浅变质砂岩及板岩; 构造为倒转单斜的一部分, 北西-南东向断层较为发育; 矿区内有三个基性-超基性岩杂岩体(图1), 图中分别记为①、②和③, 岩石组合为橄榄岩-辉石岩-辉长岩; 三个岩体均有不同程度的镍矿化, ③号岩体中的镍矿化具有工业价值, 即白马寨镍矿床。

矿区煌斑岩极为发育, 呈岩墙和岩脉产出, 总体呈东西向展布, 切穿地层、基性-超基性岩体和矿体。宽多在 2~4 m, 最宽超过 10 m, 长度变化较大, 多数在 200 m 以上。岩石具典型煌斑结构, 斑晶主要为云母(10%~25%)和辉石(5%~10%), 部分样品见少量橄榄石斑晶, 基质主要为正长石(30%~55%)、云母(10%~15%)和斜长石(5%~10%), 其它矿物少见(<5%)。按国际地科联推荐的煌斑岩分类方案<sup>[7]</sup>, 该区煌斑岩均

收稿日期: 2002-12-26

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1999043203); 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-101)

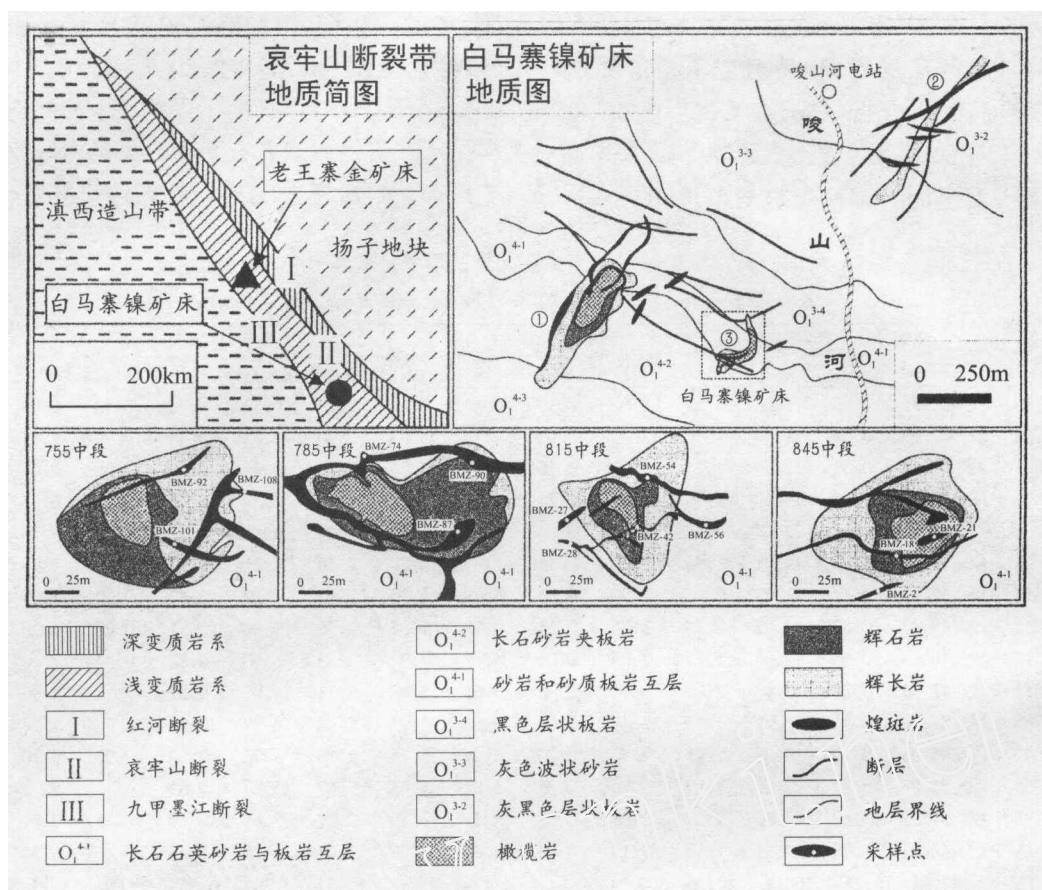


图 1 白马寨镍矿床地质图

Fig. 1. Geological map of the Baimazhai nickel deposit.

为云煌岩。岩石普遍遭受蚀变, 常见有绿泥石化、蛇纹石化、绢云母化、硅化和高岭石化。与“三江”富碱侵入岩带其它地区煌斑岩相比(如老王寨金矿、北衙金矿、马厂管铜一金矿等), 本区煌斑岩的蚀变作用相对较弱, 尤其是碳酸盐化少见。

矿区煌斑岩切穿各时代地层、基性-超基性岩体和矿体, 表明为成矿期后产物, 邓家藩<sup>[8]</sup>认为白马寨镍矿床形成于华力西期; Zhang 等<sup>[2]</sup>报道与白马寨镍矿床相距约 10 km 的金平十里村透闪石花岗岩和铜厂正长斑岩的年龄分别为  $(35.8 \pm 0.5)$  Ma 和  $(37.7 \pm 0.7)$  Ma, 这两个岩体中均有煌斑岩脉产出; 区域上“三江”富碱侵入岩带的众多岩体中都有煌斑岩产出, 且富碱侵入岩与煌斑岩的成岩时代相近(35 Ma 左右)<sup>[1-3]</sup>。该区煌斑岩与老王寨金矿煌斑岩具有相似的矿物组合、主要元素和微量元素地球化学(详见后文), 后者的成岩时代为 35 Ma 左右。这些特征表明, 白马寨镍矿区煌斑岩可能形成于喜山期。

## 2 样品及分析方法

分析样品取用相对新鲜煌斑岩, 灰绿-灰黑色, 原生岩浆结构, 除橄榄石和部分辉石被次生矿物替代外, 其它矿物蚀变较弱, 大部分样品见辉石蚀变残余。主量元素由中国科学院地球化学研究所用湿化学方法分析; 微量元素由中国科学院地球化学研究所 ICP-MS 分析, Qi 等<sup>[9]</sup>介绍了该 ICP-MS 的分析方法和流程, 分析过程中以国际标准样品 AMH-1(安山岩)为标样, 分析误差小于 10%。

## 3 结果

### 3.1 主要元素

表 1 为白马寨镍矿区 15 件煌斑岩的主要元素分析结果和 CIPW 计算值, 为便于对比, 表中同时列出该矿区、老王寨金矿区和钙碱性煌斑岩主要元素含量范围。从表 1 中可见, 研究区煌斑岩

的  $w(\text{SiO}_2)$  为 47.94% ~ 55.88%,  $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  7.01% ~ 9.81%,  $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$  1.66 ~ 2.64, 除 2 件样品的外(样品 BMZ-108 和 BMZ-90), 其余样品的组合指数( $\sigma$ ) 在 4.06 ~ 7.56, 在  $w(\text{SiO}_2)/w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  图上(图 2A), 所有样品落在 Rock<sup>[11]</sup> 圈定的钙碱性煌斑岩范围内。本区

煌斑岩的  $n(\text{K})/n(\text{Al})$ : 0.32 ~ 0.50,  $n(\text{K})/n(\text{K} + \text{Na})$ : 0.52 ~ 0.63, 均在路凤香等<sup>[12]</sup>划分的钾质煌斑岩内 [ $n(\text{K})/n(\text{Al}) < 0.80$ ,  $n(\text{K})/n(\text{K} + \text{Na}) > 0.5$ ]; 在  $n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{K}_2\text{O})$  图中(图 2B), 绝大部分样品落在富钾质型岩石系列。可见白马寨镍矿区矿区煌斑岩为钾质-富钾质钙碱性煌斑岩。

表 1 云南白马寨镍矿区煌斑岩主要元素的质量分数和 CIPW 计算结果

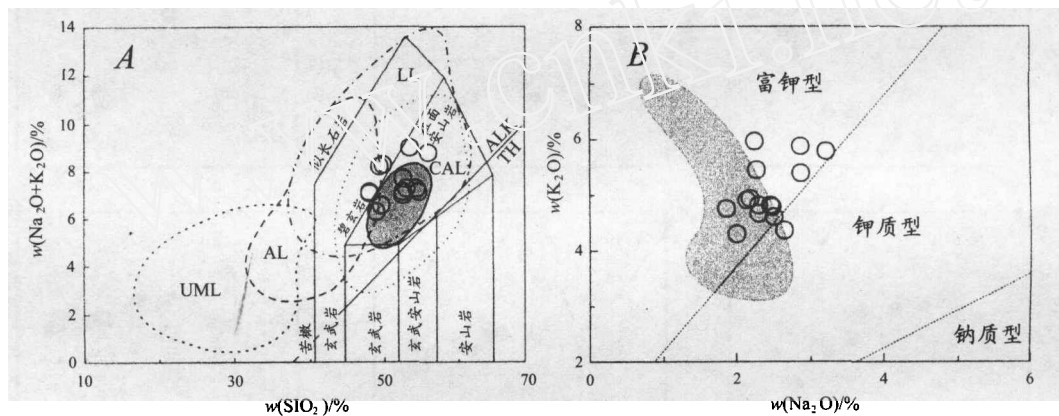
Table 1. The major element mass fraction and CIPW of lamprophyres in the Bamazhai nickel deposit

样品	采样位置	$w_2/\%$													
		$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}$	$\text{MnO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{CO}_2$	烧失量	总量
BMZ-74	785 中段	52.51	0.68	12.66	2.52	3.02	0.10	7.15	7.07	2.29	4.83	0.42	0.40	6.02	99.67
BMZ-101	755 中段	52.60	0.58	11.44	1.40	3.30	0.05	9.70	5.50	2.30	4.68	0.42		7.65	99.62
BMZ-27	815 中段	48.11	0.52	13.95	1.74	3.10	0.10	9.97	5.75	2.14	4.92	0.50		8.68	99.48
BMZ-56	815 中段	52.51	0.65	13.20	2.78	1.95	0.22	6.57	6.91	2.64	4.37	0.45	0.55	6.65	99.45
BMZ-136	地表	53.47	0.37	12.47	1.22	3.65	0.04	4.54	6.19	3.21	5.80	0.57	0.30	7.54	99.37
BMZ-108	755 中段	54.70	0.34	11.71	1.55	3.05	0.19	7.39	5.78	2.50	4.61	0.47		7.14	99.43
BMZ-54	815 中段	52.93	0.37	11.47	2.06	2.99	0.16	6.78	6.35	2.45	4.82	0.42	0.30	8.25	99.35
BMZ-2	845 中段	49.41	0.52	14.92	2.75	3.05	0.14	4.78	7.84	2.26	5.96	0.57	0.20	7.26	99.66
BMZ-28	815 中段	49.94	0.58	13.66	1.81	3.85	0.06	4.47	7.92	2.88	5.40	0.62	0.44	7.60	99.23
BMZ-18	845 中段	47.94	0.25	12.96	1.69	3.70	0.08	9.65	5.49	2.18	4.95	0.57		9.95	99.41
BMZ-90	785 中段	54.43	0.46	11.71	1.12	3.46	0.07	6.88	5.97	2.49	4.79	0.35		7.58	99.31
BMZ-21	845 中段	49.51	0.50	10.52	1.78	2.90	0.10	10.25	6.75	1.86	4.75	0.50	0.30	9.70	99.46
BMZ-92	755 中段	55.88	0.37	12.66	1.62	3.10	0.07	5.07	5.73	2.57	5.87	0.52		5.73	99.49
BMZ-87	785 中段	52.53	0.43	12.69	2.30	2.80	0.06	5.21	6.75	2.27	5.45	0.50	0.45	7.81	99.38
BMZ-42	815 中段	48.95	0.25	14.51	2.13	3.15	0.23	6.88	4.95	2.01	4.29	0.45		9.58	99.48
范围		47.94 ~ 55.88	0.25 ~ 0.68	10.52 ~ 14.92	1.12 ~ 2.78	1.95 ~ 3.85	0.04 ~ 0.23	4.47 ~ 10.29	4.95 ~ 7.92	1.86 ~ 3.21	4.29 ~ 5.96	0.35 ~ 0.62	0.00 ~ 0.55	5.73 ~ 9.95	
老王寨 <sup>[10]</sup>		49.07 ~ 56.64	0.58 ~ 1.15	10.52 ~ 15.53	1.05 ~ 4.99	3.13 ~ 5.69	0.11 ~ 0.31	6.10 ~ 12.12	5.88 ~ 9.81	1.01 ~ 2.82	2.78 ~ 6.80	0.46 ~ 0.82			
钙碱性煌斑岩 <sup>[14]</sup>		51.5 ± 4.0	1.3 ± 0.6	14.0 ± 2.3	3.7 ± 2.3	4.9 ± 1.8	0.15 ± 0.14	6.9 ± 2.6	6.6 ± 2.2	2.7 ± 1.0	3.8 ± 2.0	0.71 ± 0.52	2.2 ± 2.4		
样品	$\sigma$	$w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$	$n(\text{K}_2\text{O})/n(\text{Na}_2\text{O})$	$n(\text{K})/n(\text{Al})$	$n(\text{K})/n(\text{Na} + \text{K})$	$n(\text{Mg})/n(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$	CIPW 计算结果								
							Cc	Il	Ap	Mt					
BMZ-74	4.42	7.60	2.11	0.41	0.58	80.84	0.97	1.38	1.04	3.90					
BMZ-101	4.06	7.59	2.03	0.44	0.57	83.97	0.00	1.20	1.06	2.21					
BMZ-27	6.05	7.78	2.30	0.38	0.60	85.15	0.00	1.09	1.28	2.78					
BMZ-56	4.20	7.55	1.66	0.36	0.52	85.73	1.35	1.33	1.12	4.34					
BMZ-136	6.32	9.81	1.81	0.50	0.54	68.92	0.74	0.76	1.44	1.93					
BMZ-108	3.65	7.70	1.84	0.43	0.55	81.20	0.00	0.70	1.18	2.43					
BMZ-54	4.22	7.98	1.97	0.45	0.56	80.17	0.75	0.77	1.07	3.28					
BMZ-2	7.56	8.90	2.64	0.43	0.63	73.64	0.49	1.07	1.43	4.31					
BMZ-28	7.10	9.04	1.88	0.43	0.55	67.42	1.09	1.20	1.57	2.86					
BMZ-18	6.00	7.97	2.27	0.41	0.60	82.30	0.00	0.53	1.48	2.74					
BMZ-90	3.86	7.94	1.92	0.44	0.56	78.00	0.00	0.95	0.88	1.77					
BMZ-21	4.46	7.36	2.55	0.49	0.63	86.35	0.76	1.06	1.29	2.87					
BMZ-92	5.23	9.32	2.05	0.50	0.57	74.46	0.00	0.75	1.29	2.50					
BMZ-87	4.95	8.43	2.40	0.46	0.61	76.84	1.12	0.89	1.27	3.78					
BMZ-42	4.29	7.01	2.13	0.32	0.58	83.40	0.00	0.53	1.16	3.43					
范围	3.65 ~ 7.56	7.01 ~ 9.81	1.66 ~ 2.64	0.32 ~ 0.50	0.52 ~ 0.63	67.42 ~ 86.35	0.00 ~ 1.35	0.53 ~ 1.38	0.88 ~ 1.57	1.77 ~ 4.34					
老王寨 <sup>[10]</sup>	2.92 ~ 7.78	5.02 ~ 8.92	1.25 ~ 6.73	0.24 ~ 0.67	0.45 ~ 0.82	72.28 ~ 83.27		1.10 ~ 2.22	1.07 ~ 1.86	1.52 ~ 7.36					

续表 1

样 品	CIPW 计算结果											
	Or	Ab	An	Di-Wo	Di-En	Di-Fs	Hy-En	Hy-Fs	Ol-Fa	Ol-Fo	Q	Ne
BMZ-74	30.47	20.69	10.68	8.83	6.89	0.98	12.13	1.72	0.00	0.00	0.32	0.00
BMZ-101	30.06	21.16	7.68	7.94	6.08	1.02	14.33	2.40	0.76	4.10	0.00	0.00
BMZ-27	32.01	17.29	15.34	5.21	4.06	0.59	0.00	0.00	2.60	16.32	0.00	1.43
BMZ-56	27.82	24.07	12.13	7.47	6.28	0.24	11.36	0.43	0.00	0.00	2.05	0.00
BMZ-136	37.31	28.73	2.71	10.28	6.59	3.01	0.00	0.00	2.02	4.01	0.00	0.46
BMZ-108	29.51	22.92	7.71	8.37	6.18	1.38	13.77	3.07	0.00	0.00	2.77	0.00
BMZ-54	31.26	22.75	6.66	9.54	7.12	1.47	11.42	2.35	0.00	0.00	1.57	0.00
BMZ-2	38.11	13.34	14.03	9.47	6.96	1.60	0.00	0.00	1.05	4.15	0.00	3.98
BMZ-28	34.82	18.71	9.16	10.97	7.16	3.04	0.00	0.00	1.64	3.50	0.00	4.27
BMZ-18	32.69	18.55	12.25	5.86	4.36	0.93	0.00	0.00	3.71	15.78	0.00	1.12
BMZ-90	30.85	22.97	7.22	9.43	6.71	1.88	11.97	3.35	0.00	0.00	2.00	0.00
BMZ-21	31.26	17.53	7.05	10.24	8.07	1.01	7.65	0.96	1.24	8.99	0.00	0.00
BMZ-92	36.99	25.90	4.61	9.22	6.46	1.98	7.01	2.15	0.00	0.00	1.13	0.00
BMZ-87	35.16	20.97	9.11	8.77	6.59	1.30	7.58	1.50	0.00	0.00	1.94	0.00
BMZ-42	28.19	18.92	20.21	1.60	1.21	0.22	14.15	2.58	1.30	6.47	0.00	0.00
范 围	27.82~ 38.11	13.34~ 28.73	2.71~ 20.21	1.60~ 10.97	1.21~ 8.07	0.22~ 3.04	0.00~ 14.33	0.00~ 3.35	0.00~ 3.71	0.00~ 16.32	0.00~ 2.77	0.00~ 4.27
老王寨 <sup>[10]</sup>	16.45~ 40.23	6.66~ 20.56	5.57~ 20.23	3.99~ 13.60	2.71~ 9.47	0.29~ 3.30	0.00~ 17.60	0.00~ 4.53	0.00~ 4.84	0.00~ 14.81	0.00~ 4.00	0.00~ 3.37

注:  $\sigma = w(K_2O + Na_2O)^2 / [w(SiO_2)^2 - 43]$ , 表示岩石的组合指数;  $w(Na_2O + K_2O)$  为去烧失量后重新换算成 100% 的结果。



CAL. 钙碱性煌斑岩 AL. 碱性煌斑岩 UML. 超镁铁煌斑岩  
LL. 钾镁煌斑岩 ALK. 碱性岩 TH. 拉斑玄武岩 图 2A 据文献[11]

图 2 煌斑岩  $w(SiO_2)$ - $w(Na_2O + K_2O)$  图和  $w(Na_2O)$ - $w(K_2O)$  图

Fig. 2.  $SiO_2$  vs.  $(K_2O + Na_2O)$  plot and  $Na_2O$  vs.  $K_2O$  plot of lamprophyres.

从 CIPW 计算结果可见(表 1), 本区煌斑岩浅色矿物以长石为主, 除 2 件样品(样品 BMZ-2 和 BMZ-42)的  $Or > An > Ab$  外, 其余样品的  $Or > Ab > An$ ; 在 15 件样品中有 7 件出现石英(Q), 5 件出现霞石(Ne)。暗色矿物较为复杂, 15 件样品均出现透辉石(Di), 10 件样品出现紫苏辉石(Hy), 8 件样品出现橄榄石(Ol)。副矿物钛铁矿(II)、磷灰石(Ap)和磁铁矿(Mt)的含量较低, 大部分样品  $II + Ap + Mt < 5\%$ 。这些特征表明, 本区既有  $SiO_2$  过饱和煌斑岩, 也有  $SiO_2$  低度不饱和和  $SiO_2$  极度不饱和煌斑岩。

本区煌斑岩的  $M$  值为  $67.42 \sim 86.35 [M = 100 \times n(Mg) / n(Mg + Fe^{2+})]$ , 图 3 显示  $M$  值与大部分主要元素含量存在线性相关关系, 尤其是  $Na_2O$  和  $K_2O$  与  $M$  值之间具有较好的负相关关系, 暗示煌斑岩在成岩过程中存在结晶分异作用。

云南老王寨金矿床与白马寨镍矿床分别位于“三江”富碱侵入岩带的北段和南段。从表 1 中可见, 两矿区煌斑岩的主要元素含量和 CIPW 标准矿物具有相近的变化范围。相比之下, 白马寨镍矿区煌斑岩的  $Na_2O$ 、 $K_2O$  含量相对稳定, 且

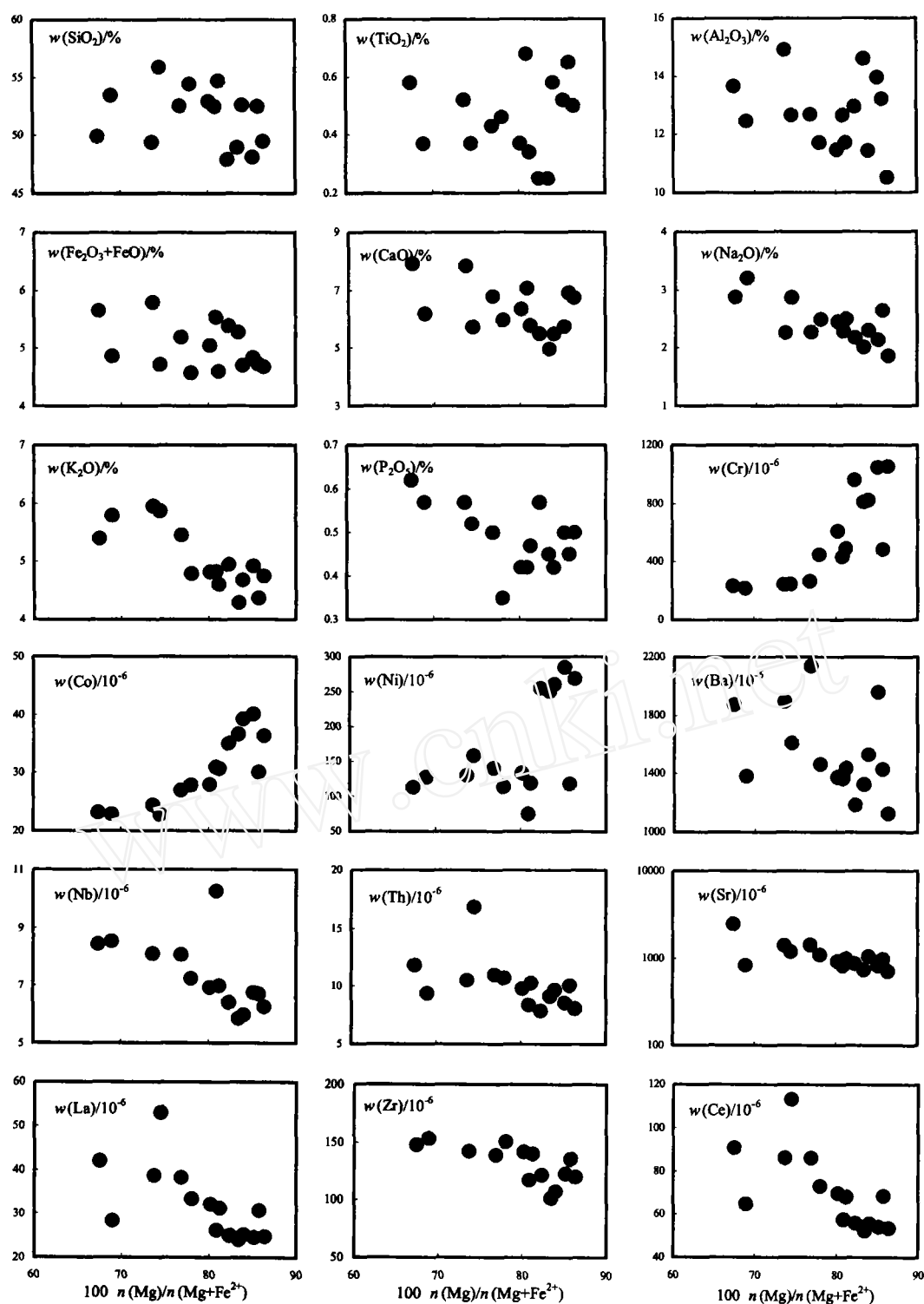


图3 煌斑岩 M 值与主要元素和微量元素相关图

Fig. 3. The M values vs. major and trace elements diagrams of lamprophyres.

Na<sub>2</sub>O 含量相对较高(图 2B)。

### 3.2 微量元素

表 2 为白马寨镍矿区 15 件煌斑岩样品的微量元素分析结果,为便于对比,表中同样列出该矿

区、老王寨金矿区煌斑岩和钙碱性煌斑岩微量元素含量范围。

#### 3.2.1 过渡元素

从表 2 中可见,矿区煌斑岩过渡元素 Sc、V 和

Co的含量相对稳定,其它过渡元素(Cr、Ni、Cu和Zn)的含量具有较宽变化范围,尤其是Cr和Ni,其质量分数分别为 $218 \times 10^{-6} \sim 1056 \times 10^{-6}$ 和 $75.2 \times 10^{-6} \sim 286 \times 10^{-6}$ 。图3显示Cr、Co和Ni含量与M值之间较好的正相关关系,表明该区煌斑岩过渡元素含量变化与岩浆结晶分异作用有关。与Jagoutz等<sup>[13]</sup>估算的原始地幔相比,本区煌斑岩相对富集V和Cu,明显亏损Cr、Co和Ni,这与许多

幔源基性超基性岩、碱性岩的过渡元素含量特征一致。矿区煌斑岩过渡元素含量范围总体与老王寨金矿区煌斑岩<sup>[10]</sup>相近,其平均含量亦可与Rock<sup>[14]</sup>统计的钙碱性煌斑岩对比(表2)。在MORB<sup>[15]</sup>标准化的微量元素分配模式上(图4),岩石Ti和Sc相对低于MORB,而Cr和Ni相对略高于MORB,也与老王寨金矿区煌斑岩和Rock<sup>[14]</sup>统计的钙碱性煌斑岩相似。

表2 云南白马寨镍矿区煌斑岩微量元素含量

Table 2. The trace element contents of lamprophyres in the Baimazhai nickel deposit

$w_B/10^{-6}$

样品	采样位置	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Rb	Ba	
BMZ-74	785中段	23.6	154	434	31.0	75.2	18.4	83.6	828	176	1365	
BMZ-101	755中段	19.9	138	824	39.3	261	61.9	68.0	1061	154	1528	
BMZ-27	815中段	19.1	127	1048	40.1	286	46.7	66.5	823	216	1960	
BMZ-56	815中段	22.0	141	483	30.1	119	60.0	61.8	989	149	1429	
BMZ-136	地表	14.9	127	218	22.9	128	34.0	77.1	838	219	1383	
BMZ-108	755中段	22.0	141	491	30.7	119	79.2	391	998	151	1434	
BMZ-54	815中段	19.6	121	609	27.9	133	50.5	55.6	933	174	1377	
BMZ-2	845中段	18.9	135	242	24.4	130	54.8	75.7	1426	228	1895	
BMZ-28	815中段	18.1	134	234	23.2	113	55.7	80.9	2500	213	1874	
BMZ-18	845中段	18.1	116	964	35.1	255	43.9	59.9	874	208	1185	
BMZ-90	785中段	21.2	131	447	27.9	114	65.1	269	1108	176	1466	
BMZ-21	845中段	18.9	115	1056	36.5	269	55.1	59.9	709	196	1127	
BMZ-92	755中段	15.3	119	246	22.8	159	40.8	86.6	1199	217	1608	
BMZ-87	785中段	20.2	148	266	27.0	140	85.8	88.7	1438	235	2141	
BMZ-42	815中段	19.9	134	811	36.6	251	60.0	64.8	740	145	1326	
范围		14.9~ 23.6	115~ 154	218~ 1056	22.8~ 40.1	75.2~ 286	18.4~ 85.8	55.6~ 391	709~ 2500	145~ 235	1127~ 2141	
老王寨 <sup>[10]</sup>		18.9~ 33.1	110~ 184	247~ 565	21.3~ 38.0	74.8~ 365	3.59~ 61.3	36.2~ 126	609~ 2784	92.6~ 259	1243~ 2779	
钙碱性煌斑岩 <sup>[14]</sup>		20	170	370	36	150	43	88	715	70	1050	
样品		U	Th	Nb	Ta	Zr	Hf	La	Ce	Pr	Nd	Sm
BMZ-74		2.93	8.40	10.3	0.606	118	3.53	26.28	57.64	6.24	26.50	5.60
BMZ-101		3.15	9.72	5.98	0.365	108	3.22	25.27	55.75	6.02	24.71	5.24
BMZ-27		3.47	8.60	6.75	0.414	123	3.58	24.63	54.33	6.05	26.43	5.72
BMZ-56		3.34	10.1	6.70	0.387	136	3.93	30.75	68.55	7.58	31.82	6.51
BMZ-136		4.27	9.37	8.54	0.509	153	4.41	28.33	64.63	7.16	30.54	6.53
BMZ-108		3.38	10.3	6.99	0.432	140	3.95	31.27	68.09	7.54	32.25	6.36
BMZ-54		3.09	9.80	6.93	0.401	142	4.14	32.12	69.71	7.75	31.30	6.36
BMZ-2		3.56	10.5	8.12	0.481	142	4.23	38.66	86.14	9.70	39.80	8.18
BMZ-28		4.23	11.8	8.44	0.488	148	4.30	42.01	90.90	9.73	40.51	8.04
BMZ-18		3.14	7.89	6.41	0.387	122	3.55	25.07	55.97	6.09	25.40	5.37
BMZ-90		3.36	10.7	7.24	0.436	151	4.33	33.38	72.93	7.88	32.91	6.53
BMZ-21		3.17	8.08	6.26	0.394	120	3.58	24.75	53.67	5.84	24.80	5.24
BMZ-92		5.06	16.9	22.4	1.315	236	6.70	52.99	113.29	11.51	46.70	9.24
BMZ-87		3.63	11.0	8.09	0.483	139	4.25	38.31	86.25	9.58	40.34	8.43
BMZ-42		2.93	9.16	5.86	0.340	102	3.00	24.09	52.43	5.69	23.30	4.73
范围		2.93~ 5.06	7.89~ 16.9	5.86~ 22.4	0.34~ 1.32	102~ 236	3.00~ 6.70	24.09~ 52.99	52.43~ 113.29	5.69~ 11.51	23.30~ 46.70	4.73~ 9.24
老王寨 <sup>[10]</sup>		2.67~ 6.43	6.48~ 16.7	5.93~ 10.3	0.45~ 0.73	78.4~ 218	2.88~ 7.31	20.99~ 85.13	44.49~ 162.56	5.75~ 18.21	23.89~ 63.56	5.26~ 10.08
钙碱性煌斑岩 <sup>[14]</sup>		3	9	13	0.9	190	5.2	53	110	11	56	10.5

续表 2

样 品	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
BMZ-74	1.54	4.75	0.69	3.92	0.78	2.20	0.33	2.07	0.32	21.18
BMZ-101	1.59	4.36	0.61	3.25	0.63	1.72	0.23	1.64	0.24	16.79
BMZ-27	1.71	4.55	0.63	3.35	0.66	1.74	0.23	1.60	0.24	17.74
BMZ-56	1.69	4.93	0.67	3.70	0.70	1.96	0.27	1.76	0.25	18.72
BMZ-136	1.74	5.42	0.72	3.95	0.69	1.95	0.24	1.64	0.25	19.71
BMZ-108	1.73	5.11	0.69	3.70	0.71	1.88	0.24	1.89	0.27	18.65
BMZ-54	1.73	5.07	0.67	3.58	0.67	1.75	0.26	1.62	0.25	19.17
BMZ-2	2.29	6.58	0.85	4.31	0.85	2.14	0.28	1.74	0.26	22.99
BMZ-28	2.27	6.59	0.84	4.29	0.79	2.03	0.27	1.85	0.27	22.54
BMZ-18	1.60	4.42	0.62	3.25	0.61	1.72	0.22	1.55	0.22	17.05
BMZ-90	1.88	5.22	0.69	3.63	0.71	1.84	0.28	1.71	0.25	19.13
BMZ-21	1.49	4.31	0.60	3.28	0.62	1.66	0.24	1.50	0.23	16.63
BMZ-92	2.21	7.54	1.07	5.54	1.02	2.86	0.41	2.86	0.43	30.10
BMZ-87	2.34	6.71	0.85	4.44	0.83	2.25	0.29	1.94	0.28	22.61
BMZ-42	1.40	4.05	0.51	3.08	0.57	1.58	0.23	1.52	0.21	15.73
范 围	1.40~ 2.34	4.05~ 7.54	0.51~ 1.07	3.08~ 5.54	0.57~ 1.02	1.58~ 2.86	0.22~ 0.41	1.50~ 2.86	0.21~ 0.43	15.73~ 30.10
老王寨 <sup>[10]</sup>	1.19~ 2.60	4.32~ 7.68	0.61~ 1.01	3.40~ 5.20	0.65~ 0.97	1.49~ 2.59	0.18~ 0.41	1.06~ 2.27	0.15~ 0.34	17.05~ 29.35
钙碱性煌斑岩 <sup>[14]</sup>	3.1	11	1.1	3.7	0.9	1.6	0.24	1.8	0.26	23
样 品	$\Sigma$ REE	LREE	HREE	LREE/ HREE	$\delta$ Eu	$\delta$ Ce	$(La/Sm)_N$	$(La/Sm)_N$	$(Gd/Yb)_N$	
BMZ-74	160.02	123.79	15.05	8.23	0.91	1.08	8.58	2.95	1.86	
BMZ-101	148.03	118.57	12.67	9.36	1.02	1.09	10.41	3.04	2.15	
BMZ-27	149.61	118.87	12.00	9.15	1.02	1.07	10.35	2.71	2.29	
BMZ-56	179.85	146.90	14.23	10.33	0.91	1.08	11.81	2.97	2.27	
BMZ-136	173.49	138.93	14.85	9.36	0.89	1.09	11.63	2.73	2.66	
BMZ-108	180.37	147.25	14.47	10.17	0.93	1.07	11.18	3.10	2.19	
BMZ-54	181.99	148.96	13.86	10.75	0.93	1.06	13.37	3.17	2.53	
BMZ-2	224.75	184.76	17.00	10.87	0.96	1.07	15.01	2.97	3.06	
BMZ-28	232.92	193.46	16.92	11.43	0.95	1.08	15.28	3.29	2.87	
BMZ-18	149.16	119.50	12.61	9.48	1.01	1.09	10.92	2.94	2.31	
BMZ-90	188.98	155.52	14.32	10.86	0.99	1.08	13.18	3.22	2.47	
BMZ-21	144.86	115.79	12.43	9.31	0.96	1.07	11.13	2.97	2.32	
BMZ-92	287.76	235.93	21.73	10.86	0.81	1.10	12.47	3.61	2.13	
BMZ-87	225.44	185.24	17.59	10.53	0.95	1.08	13.35	2.86	2.80	
BMZ-42	139.11	111.63	11.75	9.50	0.98	1.08	10.71	3.21	2.16	
范 围	139.11~ 287.76	111.63~ 235.93	11.75~ 21.73	8.23~ 11.43	0.81~ 1.02	1.06~ 1.10	8.58~ 15.28	2.71~ 3.61	1.86~ 3.06	
老王寨 <sup>[10]</sup>	136.40~ 376.81	101.88~ 342.14	12.64~ 19.77	6.62~ 21.92	0.68~ 1.00	0.89~ 1.01	6.62~ 40.62	2.23~ 5.31	1.98~ 5.28	

### 3.2.2 大离子亲石元素(LILE)

除样品 BMZ-28 具有较高的 Sr 含量外( $2500 \times 10^{-6}$ ), 矿区煌斑岩 LILE(Sr、Rb 和 Ba)含量的变化范围较小, 且总体与老王寨金矿煌斑岩<sup>[10]</sup>重叠, 平均含量亦可与 Rock<sup>[14]</sup>统计的钙碱性煌斑岩对比(表 2)。岩石的  $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$  相对稳定, 大部分样品在 0.60~0.76 之间, 暗示 LILE 之间具有相似的变化规律。图 3 中 Sr 和 Ba 与  $M$  值之间较好的负相关关系, 表明该区煌斑岩 LILE 含量变

化与岩浆结晶分异作用有关。与 MORB 相比, 本区煌斑岩明显富集 LILE(图 4), 尤其是 Sr 和 Ba, 大部分样品是 MORB 的 200 倍以上; 配分模式形态也与老王寨金矿区煌斑岩<sup>[10]</sup>和 Rock<sup>[14]</sup>统计的钙碱性煌斑岩相似。

### 3.2.3 高场强元素(HFSE)

从表 2 中可见, 除样品 BMZ-92 的 HFSE(U、Th、Nb、Ta、Zr 和 Hf) 含量较高外, 本区煌斑岩 HFSE 含量具有较小的变化范围, 且其变化范围总

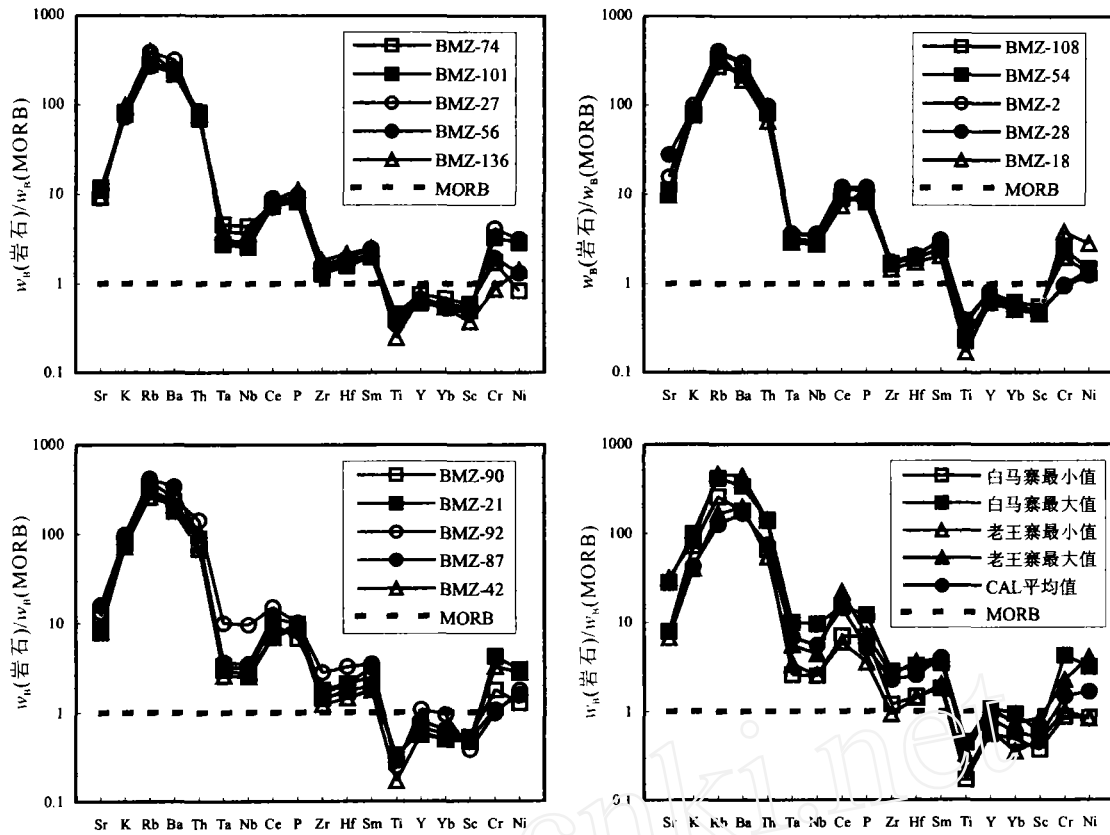


图 4 煌斑岩微量元素配分模式(MORB 据文献[15])

Fig. 4. The trace element distribution patterns of lamprophyres (MORB after Ref. [15]).

体也与老王寨金矿煌斑岩<sup>[10]</sup>重叠,平均含量同样可与 Rock<sup>[14]</sup>统计的钙碱性煌斑岩对比。岩石的  $w(U)/w(Th)$  (大部分样品在 0.32 ~ 0.36)、 $w(Nb)/w(Ta)$  (大部分样品在 16.2 ~ 17.3) 和  $w(Zr)/w(Hf)$  (大部分样品在 33.4 ~ 34.4) 相对稳定,同样暗示 HFSE 之间具有相似的变化规律。图 3 显示 Th、Nb 和 Zr 等 HFSE 均与  $M$  值呈负相关关系,同样表明矿区煌斑岩 HFSE 含量变化与岩浆结晶分异作用有关。至于样品 BMZ-92 具有较高的 HFSE,则可能与源区地幔不同部分熔融程度有关,后文将进一步分析。在微量元素配分模式上(图 4),该区煌斑岩 HFSE 高于 MORB,尤其是 Th,一般是 MORB 的 100 倍左右;配分模式形态同样与老王寨金矿区煌斑岩<sup>[10]</sup>和 Rock<sup>[14]</sup>统计的钙碱性煌斑岩相近。

### 3.2.4 稀土元素(REE)

矿区煌斑岩 REE 含量具有相对较宽的变化范围(表 2),  $w(\sum REE)$  为  $139.11 \times 10^{-6} \sim 287.76 \times 10^{-6}$  (含 Y)、 $w(LREE)$ :  $111.63 \times 10^{-6} \sim 235.93 \times 10^{-6}$ 、 $w(HREE)$ :  $11.75 \times 10^{-6} \sim 21.73 \times 10^{-6}$

(不加 Y)、 $w(LREE)/w(HREE)$ : 8.23 ~ 11.43, 总体在老王寨金矿煌斑岩<sup>[10]</sup>REE 含量变化范围之内,其平均含量相对低于 Rock<sup>[14]</sup>统计的钙碱性煌斑岩,尤其是 LREE 相对更低。从图 3 可见,La 和 Ce 与  $M$  值呈负相关关系。在图 5 中,该区煌斑岩既有水平分布趋势、也有倾斜分布趋势,暗示源区地幔部分熔融程度和岩浆结晶分异均对岩石

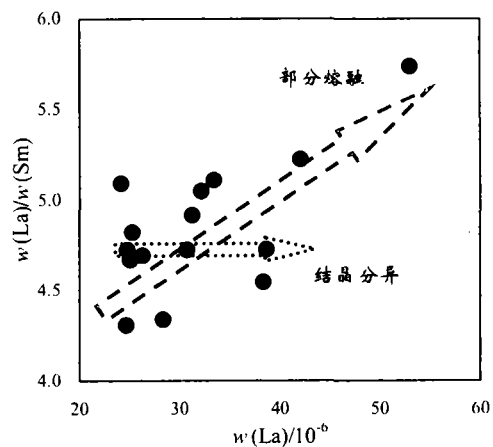


图 5 煌斑岩  $w(La)/w(Sm)-w(La)$  图

Fig. 5. La/Sm vs. La plot of lamprophyres.



REE 含量有一定的控制作用。从表 2 中可见, 样品 BMZ-92 的 REE 含量明显高于其它样品, 与 Huang 等<sup>[10]</sup>报道的老王寨金矿区高 $\Sigma$ REE 组煌斑岩的 REE 含量相近, 后者被认为是源区地幔相对低部分熔融程度的产物<sup>[10]</sup>, 同样证实本区煌斑岩 REE 含量受源区地幔部分熔融程度控制。

研究区所有煌斑岩的球粒陨石标准化 REE 配分模式为相似的 LREE 富集型(图 6),  $(La/Yb)_N$  8.58

$\sim 11.43$ ; LREE、HREE 具有较好的分馏,  $(La/Sm)_N$  2.71  $\sim$  3.61,  $(Gd/Yb)_N$  1.86  $\sim$  3.06; 大部分样品具有弱的 Eu 负异常,  $\delta Eu$  0.81  $\sim$  1.02(主要为 0.91  $\sim$  0.98), 所有样品均具有弱的 Ce 正异常,  $\delta Ce$  1.06  $\sim$  1.10。本区煌斑岩 REE 配分模式与老王寨金矿区煌斑岩<sup>[10]</sup>和 Rock<sup>[14]</sup>统计的钙碱性煌斑岩相似(图 6D), 但  $(La/Yb)_N$ 、 $(La/Sm)_N$  和  $(Gd/Yb)_N$  的变化范围相对较小(表 2)。

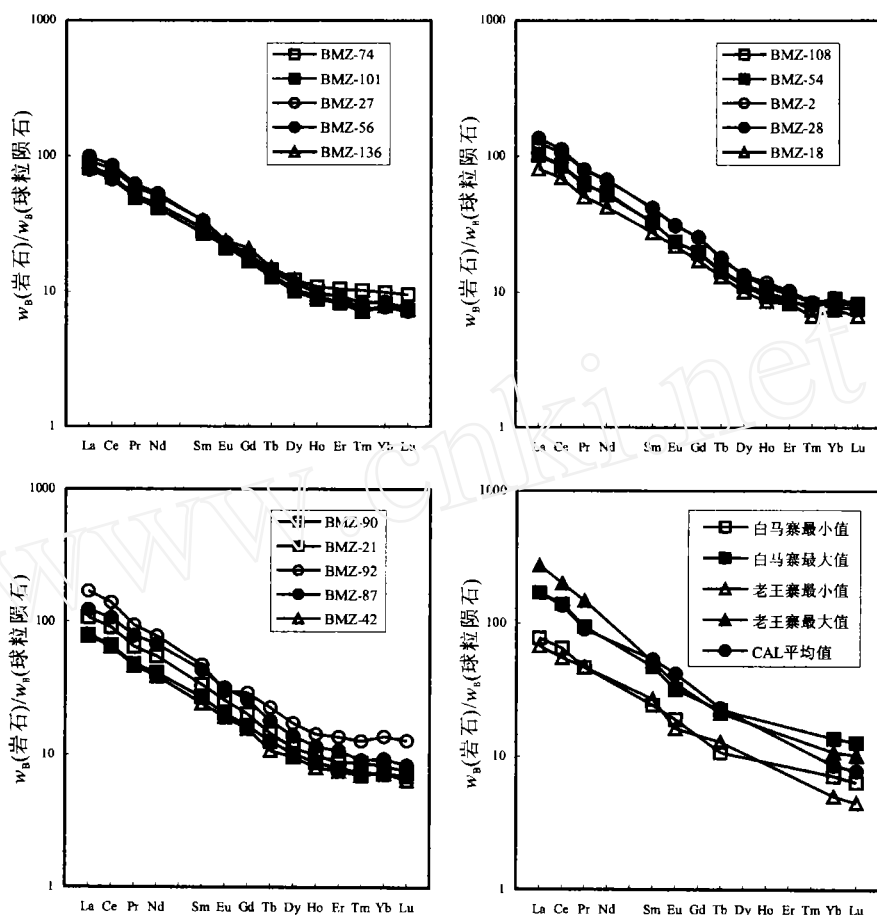


图 6 煌斑岩 REE 配分模式(球粒陨石据文献[16])

Fig. 6. The REE distribution patterns of lamprophyres (Chondrite after Ref. [16]).

#### 4 讨论及结论

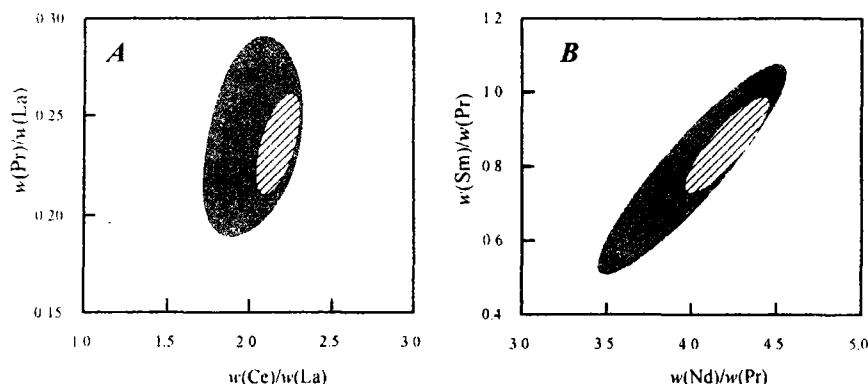
综上所述, 除个别样品外, 采自白马寨镍矿区不同中段和不同产状的煌斑岩具有相似矿物组合, 主要元素、过渡元素、LILE、HFSE 和 REE 含量相近或出现有规律的变化, 岩石均为钾质富钾质钙碱性煌斑岩, 微量元素配分模式均呈“驼峰型”(图 4), REE 配分模式为相似的 LREE 富集型(图 6), 主要元素和微量元素与  $M$  值之间存在一定的

相关关系(图 3), 在  $w(La) - w(La)/w(Sm)$  图中样品既有水平分布趋势、也有倾斜分布趋势(图 5)。这些特征表明, 出露于矿区的不同中段和不同产状的煌斑岩为相同岩浆源区的产物, 源区地幔部分熔融程度和岩浆结晶分异作用均对岩石主要元素和微量元素地球化学性质有一定的影响。

$Z/V - U/V$  图( $Z$ 、 $U$  和  $V$  为三个地球化学性质相似的微量元素)是一种有效判别岩石是否同源的图解<sup>[6]</sup>。如果是一套同源岩浆岩, 在  $Z/V$

-U/V图中理论上应落于一个点,由于分析误差等因素,实际上落入一个窄小的区域;反之,在Z/V-U/V图中则落在不同区内,或者投影点分散。任选本区煌斑岩三个REE作图可得到一系列Z/V

V-U/V组合图,本文仅示出 $w(\text{Pr})/w(\text{La})-w(\text{Ce})/w(\text{La})$ 和 $w(\text{Sm})/w(\text{Pr})-w(\text{Nd})/w(\text{Pr})$ (图7),由图可见,该区煌斑岩落在一个窄小的区域内,表明煌斑岩为相同岩浆源区的产物。



由于样品的数据集中,无法区分出单个样品,图中仅示出范围  
阴影区为老王寨金矿煌斑岩(原始数据据文献[10]),斜线区为白马寨镍矿区煌斑岩(本文)

图7 煌斑岩同源性判别图

Fig. 7. The discriminant diagram of the source regions of lamprophyres.

前已述及,本区煌斑岩与所在“三江”富碱侵入岩带的老王寨金矿区煌斑岩具有相似的构造背景、形成时代(喜山期)、矿物组合以及主要元素(表1、图2)和微量元素(表2、图3、图5)地球化学特征,在Z/V-U/V图中两矿区煌斑岩落在相似的区域(图6)。这些特征均表明两矿区煌斑岩也为同源岩浆产物。金志升等<sup>[17]</sup>和黄智龙等<sup>[6]</sup>已从多方面论证了“三江”富碱侵入岩带中的富碱

侵入岩和煌斑岩的同源性。笔者认为白马寨镍矿区煌斑岩与老王寨金矿区煌斑岩(和“三江”富碱侵入岩)可能具有相似的成岩机制,对此将在另文中详细讨论。

致谢:野外工作得到云南白马寨镍矿矿长黄精球,技术科郑宏举、白家华、周树明等工程师的大力支持和帮助,在此表示感谢!

#### 参 考 文 献:

- [1] 张玉泉, 谢应雯, 涂光炽. 横断山区花岗岩类地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [2] Zhang Y Q, Xie Y W. Geochronology of Ailaoshan-Jingshajiang alkali-rich intrusive rocks and their Sr and Nd isotopic characteristics[J]. *Science China (D)*, 40: 524-529.
- [3] Zhang L S, Schärer U. Age and origin of magmatism along the Cenozoic Red River shear belt, China[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1999, 134: 67-85.
- [4] Wang J H, Yin A, Harrison T M, Grove M, Zhang Y Q, Xie G H. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 188: 123-133.
- [5] 胡云中, 唐尚鹁, 王海平, 等. 哀牢山金矿地质[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [6] 黄智龙, 刘丛强, 朱成明, 等. 云南老王寨金矿区煌斑岩成因及其与金矿化的关系[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [7] Le Maitre R W. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [8] 邓家藩. 云南硫化物型铜镍和铂族矿床[J]. *云南地质*, 1999, 18: 22-35.
- [9] 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.
- [10] Huang Z L, Liu C Q, Yang H L, Xu C, Han R S, Xiao H Y, Zhang B, Li W B. The geochemistry of lamprophyres in the Laowangzhai gold deposits, Yunnan Province, China: Implications for its characteristics of source region[J]. *Geochem J*, 2002, 36: 91-112.
- [11] Rock N M S. The nature and origin of lamprophyres: an overview[J]. *Geol Soc Spec Publ*, 1987, 30: 191-226.

- [12] 路凤香, 舒小辛, 赵崇贺. 有关煌斑岩分类的建议[J]. 地质科技情报, 1991, 10(增刊): 55~62.
- [13] Jagoutz E, *et al.* The abundances of major, minor and trace elements in the Earth's as derived from primitive ultramafic nodules[J]. *Proc Lunar Sci Conf*, 1979, 10: 2031~2050.
- [14] Rock N M S. *Lamprophyres* [M]. Glasgow, Blackie, 1990.
- [15] Sun S S, McDoonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes[J]. *Geol Soc Spec Pub*, 1989, 42: 313~345.
- [16] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[J]. *Dev Geochem*, 1984, 2: 63~114.
- [17] 金志升, 黄智龙, 朱成明. 云南三江地区富碱侵入岩与煌斑岩的同源性[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1997, 16(4): 222~224.

## GEOCHEMISTRY OF LAMPROPHYRES IN BAIMAZHAI NICKEL DEPOSIT, YUNNAN PROVINCE, I. MAJOR AND TRACE ELEMENTS

GUAN Tao<sup>1,2</sup>, HUANG Zhi-long<sup>1</sup>, XIE Li-hua<sup>1</sup>, XU Cheng<sup>1,2</sup>, LI Wen-bo<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002;

2. Graduate school, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract:** Lamprophyres in the Baimazhai nickel deposit occurred as dyke cutting across the strata, basic-ultrabasic rocks and ore bodies, being the post-ore products. Lamprophyre samples from different levels and of different occurrences have similar paragenetic associations of minerals, and the rock type is dominated by lamprophyres. Evidence from major elements showed that the lamprophyres are potassic and potassium-rich calc-alkaline ones. The trace element patterns are of the hump type. Compared to MORB, they are characterized by enrichment in LILE and HFSE. Meanwhile, the REE patterns are of the LREE-enrichment type. There is a linear variation trend between M values and major and trace elements. There are both horizontal and oblique tendencies in the La-La/Sm diagram. In general, the lamprophyres were derived from the same magmatic source region in the Baimazhai nickel deposit. Both partial melting and fractional crystallization affected the evolution of trace and major elements in the rocks. Geological setting, rock type and the characteristics of major and trace elements of the lamprophyres in the deposit are similar to those of the Laowangzhai gold deposit. It is concluded that the mantle-source regions for the lamprophyres in the two areas have the same or similar properties.

**Key words:** lamprophyre; major element; trace element; Baimazhai nickel deposit