

# 美姑县南红玛瑙矿区玄武岩地球化学特征和岩石成因

周王鹏<sup>1</sup>, 朱余银<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳

<sup>2</sup>西南科技大学环境与资源学院国土资源利用研究所, 四川 绵阳

Email: 1410560394@qq.com, \*jsjzyy@126.com

收稿日期: 2020年11月22日; 录用日期: 2020年12月16日; 发布日期: 2020年12月23日

## 摘要

凉山州美姑县发育一套与南红玛瑙成矿关系紧密的玄武岩, 对该玄武岩元素质量分数和相关性进行分析。研究表明: 玄武岩  $\omega(\text{SiO}_2)$  为 50.33%~52.51%,  $\omega(\text{TiO}_2)$  为 2.64%~4.08%,  $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 13.10%~13.40%, 全碱  $\omega(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$  为 2.74%~4.25%,  $\omega(\text{MgO})$  为 3.60%~4.94%, Mg 指数为 32.01~38.17。玄武岩轻稀土元素(LREE)富集、轻重稀土元素分异作用明显, 具轻微Eu负异常( $\delta\omega(\text{Eu}) = 0.88\sim 0.96$ )和轻微的Ce正异常( $\delta\omega(\text{Ce}) = 1.01\sim 1.05$ ), 富集Rb、Ba和Th等大离子亲石元素, Nb和Ta无明显异常, 相对亏损K、P和Sr等元素。矿区玄武岩为碱性玄武岩, 形成于板内拉张环境, 为大陆裂谷构造背景。岩浆发生了轻度的源区混染, 未遭受明显的地壳物质混染; 经历了分离结晶作用, 且发生部分熔融。玄武岩可能位于地幔热柱边部, 是由石榴石二辉橄榄岩地幔部分熔融形成的, 且具有由石榴石稳定区向尖晶石稳定区过渡的特征。

## 关键词

地球化学特征, 岩石成因, 地幔柱, 玄武岩, 美姑县

# Geochemical Characteristics and Petrogenesis of Basalt of Nanhong Agate Orefield in Meigu County

Wangpeng Zhou<sup>1</sup>, Yuyin Zhu<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan

<sup>2</sup>Institute of Land and Resources, School of Environment and Resources, Southwest University of Science and

\*通讯作者。

文章引用: 周王鹏, 朱余银. 美姑县南红玛瑙矿区玄武岩地球化学特征和岩石成因[J]. 地球科学前沿, 2020, 10(12): 1189-1202. DOI: 10.12677/ag.2020.1012116

## Abstract

A set of basalts closely related to the Nanhong Agate mineralization was developed in Meigu county of Liangshan prefecture. Element concentration of the basalts and geochemical correlation analysis were made. According to the results, the  $\omega(\text{SiO}_2)$  of basalts is from 50.33% to 52.51%,  $\omega(\text{TiO}_2)$  is from 2.64% to 4.08%,  $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$  is from 13.10% to 13.40% and  $\omega(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$  is from 2.74% to 4.25%,  $\omega(\text{MgO})$  is from 3.60% to 4.94% and Mg index changes from 32.01 to 38.17. The light rare earth elements (LREE) of basalts are enriched, and the differentiation between LREE and HREE is obvious. Eu of the sample shows slight negative anomaly ( $\delta\omega(\text{Eu}) = 0.88\sim 0.96$ ), and Ce shows slight positive anomalies ( $\delta\omega(\text{Ce}) = 1.01\sim 1.05$ ). It is enriched in large ion lithophile elements (such as Rb, Ba and Th), shows no obvious anomaly in high field strength elements (such as Nb and Ta), and is relatively depleted in the elements (such as K, P and Sr). The basalts of the ore-field are alkaline basalts, formed in an intra-plate environment, which is the tectonic setting of continental rift. The magma has mild contamination of source region, and does not suffer significant continental crust material contamination. The magma underwent the fractional crystallization and partial melting. Basalts may be located in the edge of mantle plume, formed by the partial melting of garnet peridotite mantle, and have the characteristics of transition from garnet stable region to spinel stable region.

## Keywords

Geochemical Characteristics, Petrogenesis, Basalt, Mantle Plume, Meigu County

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

凉山州美姑县南红玛瑙颜色鲜艳、质地细腻、纹理丰富,深得玉器收藏界的喜爱。自2009年发现以来,前人对美姑县南红玛瑙矿床开展了一定的研究工作,但主要集中在矿床的宝石学矿物学和岩石学特征[1][2][3][4]、致色机理研究[5][6]、矿床地质特征和控矿因素分析[7]等方面,对该矿床的赋矿围岩玄武岩尚未进行系统的研究工作。

本文在对美姑县南红玛瑙矿区玄武岩进行岩相学、岩石地球化学特征研究的基础上,探讨其岩石成因,以期为美姑县南红玛瑙矿床的成矿规律研究和成矿潜力分析提供地质依据。

## 2. 大地构造背景及矿区地质概况

美姑县南红玛瑙矿区大地构造位于“川滇南北构造带”与四川盆地“新华夏系沉降带”的交接地带,属川滇南北构造与四川盆地西南边缘的台褶带的交接地带[2][8]。主要构造线受SN构造控制,兼有NE向、NW向、NNW向及NNE向构造。

矿区出露地层主要有侏罗系中统沙溪庙组(J<sub>2s</sub>)和自流井组(J<sub>2z</sub>)、三叠系中统雷口坡组(T<sub>2l</sub>)、二叠系中统峨眉山玄武岩(P<sub>2β</sub>)和乐平组(P<sub>2l</sub>)、震旦系上统灯影组(Z<sub>2dy</sub>)；南红玛瑙矿体主要赋存在二叠系中统气孔状玄武岩中(图1)。玛瑙矿区主要由三个矿带组成：九口矿带的矿体地表断续出露长>1 km，可见厚度约

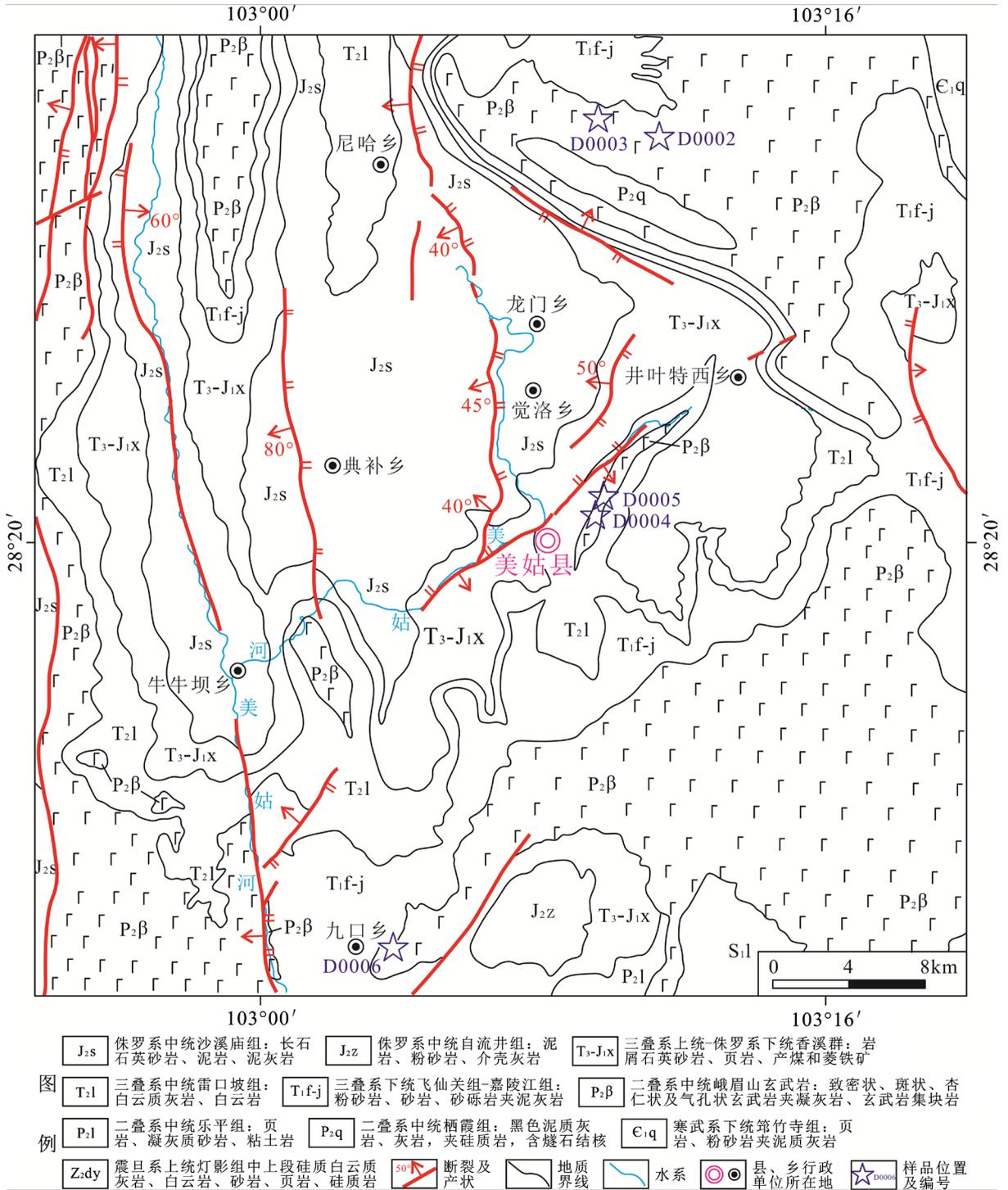


Figure 1. Geological sketch of Nanhong agate orefield in Meigu county  
图1. 美姑县南红玛瑙矿区地质简图

1 m~5 m, 产状  $306^{\circ} \angle 12^{\circ} \sim 34^{\circ}$ ; 联合(洛莫依达)矿带的矿体地表断续出露长约 0.8 km, 可见厚度约 0.8 m~3 m, 产状  $70^{\circ} \sim 130^{\circ} \angle 5^{\circ} \sim 9^{\circ}$ ; 瓦西矿带的矿体地表断续出露长 > 1 km, 可见厚度约 1 m~3.5 m, 产状  $350^{\circ} \sim 50^{\circ} \angle 20^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 。

### 3. 岩相学特征

本次共采集玄武岩样品 5 件, 其中 2 件样品(D0002、D0003)采自瓦西矿带、2 件样品(D0004、D0005)采自联合(洛莫依达)矿带、1 件样品(D0006)采自九口矿带。

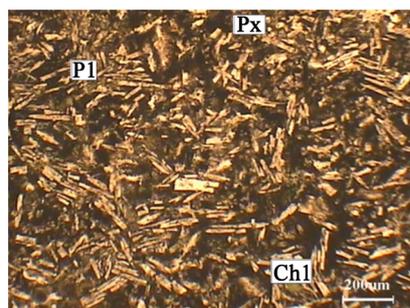
玄武岩主要呈灰色、灰黑色, 气孔和杏仁状构造(图 2(a)、图 2(b)), 基质间粒间隐结构(图 2(c))。矿物成分主要为斜长石、辉石、石英、绿泥石和少量方解石、隐晶质集合体等。斑晶主要为斜长石, 斜长石呈自形板状、针状, 大小约 0.04 mm~0.60 mm, 含量约 9%~50%, 轻微绿泥石化(图 2(d)), 以单体或团块状集合体均匀分布在基质中; 辉石呈粒状, 大小约 0.01 mm~0.07 mm, 含量约 15%~20%, 局部可见绿帘石化(图 2(e)), 均匀分布在斜长石颗粒间或呈细微晶充填于气孔中; 石英呈细微粒状充填在气孔中, 含量约 5%~7%; 绿泥石呈放射状、纤维状, 含量约 7%, 分布在斜长石间或充填在气孔中(图 2(e)、图 2(f))。含有玛瑙的气孔从内到外先充填隐晶质石英, 并发生重结晶作用形成板状、粒状石英(图 2(g)), 然后方解石、纤维状绿泥石依次充填, 最后充填纤维状和隐晶质石英, 形成圈层构造(图 2(h)), 含量约 7%; 隐晶



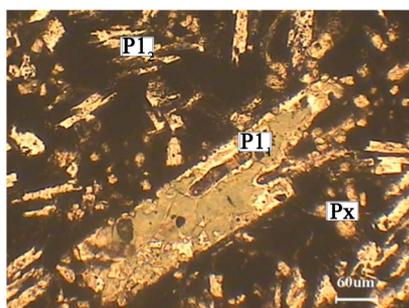
(a) 气孔状构造



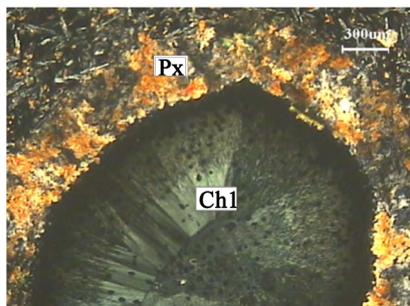
(b) 杏仁状构造



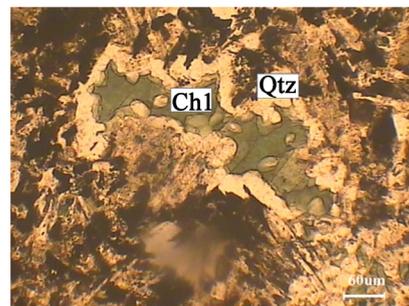
(c) 间粒间隐结构



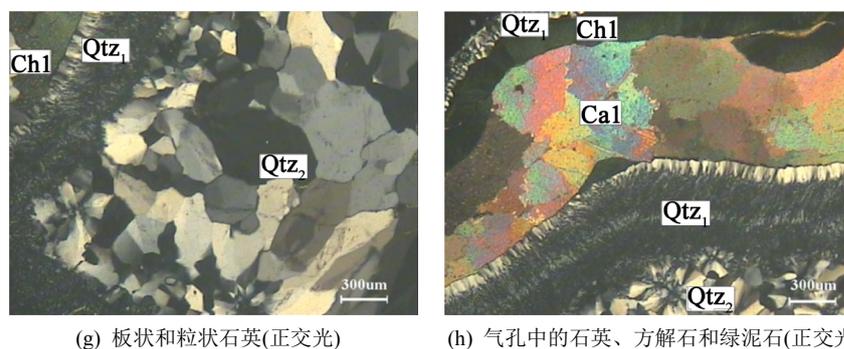
(d) 斜长石斑晶, 绿泥石化



(e) 气孔中绿泥石和辉石, 辉石局部绿帘石化(正交光)



(f) 充填在气孔中细微晶石英及绿泥石



(g) 板状和粒状石英(正交光) (h) 气孔中的石英、方解石和绿泥石(正交光)

Cal-方解石, Chl-绿泥石, Px-辉石, Pl<sub>1</sub>-自形板状斜长石, Pl<sub>2</sub>-针状斜长石, Qtz<sub>1</sub>-纤维状石英, Qtz<sub>2</sub>-粒状石英

**Figure 2.** Photos of basalt of Nanhong agate orefield in Meigu county

**图 2.** 美姑县南红玛瑙矿区玄武岩照片

质集合体呈团块状分布于斜长石颗粒间(图 2(a)、图 2(d)), 含量约 20%~22%。

#### 4. 岩石地球化学特征

样品的主量 - 微量 - 稀土元素配套分析由澳实分析检测(广州)有限公司完成。主量元素采用硼酸锂/偏硼酸锂熔融, X 荧光光谱分析(XRF)进行测定; 微量元素采用四酸消解, 等离子光谱(ICP-AES)进行分析; 稀土元素用硝酸定容, 再用等离子体质谱仪(ICP-MS)分析。测试过程按《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ/T0130.3-2006)进行, 分析精度优于 5%。

##### 4.1. 主量元素地球化学特征

主量元素测试结果见表 1,  $\omega(\text{SiO}_2)$  介于 50.33%~52.51% 之间, 平均值为 51.64%, 含量较高(>49%), 但低于上地壳平均值 66% (文中引用上地壳的元素平均值均为 Taylor 1985 年标准)。 $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 13.10%~13.40%, 平均值为 13.30%。 $\omega(\text{TiO}_2)$  为 2.64%~4.08%, 平均值为 3.08%。 $\omega(\text{K}_2\text{O})$  为 0.58%~1.72%, 平均值为 1.08%;  $\omega(\text{Na}_2\text{O})$  为 1.68%~2.67%, 平均值为 2.35%;  $\omega(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$  含量较低, 介于 2.74%~4.25% 之间, 均值为 3.44%。 $\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3)$  为 13.44%~15.84%, 均值为 14.80%。 $\omega(\text{CaO})$ 、 $\omega(\text{MgO})$ 、 $\omega(\text{MnO})$  的平均值分别为 8.04%、4.10%、0.22%, 均高于上地壳平均值(4.20%、2.20%、0.08%)。

去除 LOI 后, 将主要氧化物成分重新计算到 100%, 对样品进行 TAS 投图(图 3(a)), 4 件样品落在玄武岩区, 1 件位于玄武安山岩区, 可能是由于该玄武岩气孔中含玛瑙或基质中充填隐晶质石英而导致  $\text{SiO}_2$  含量过高所致, 与薄片镜下鉴定结果基本一致, 说明美姑县南红玛瑙矿区赋矿围岩以玄武岩为主。由于 K、Na 为碱性金属元素, 其在岩石蚀变过程中较活泼, 而不相容或耐熔元素 Zr、Ti、Nb、Y 等在岩石蚀变过程中比值基本不发生变化或变化范围较小[9], 因此本文采用  $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{TiO}_2)$ - $\omega(\text{Nb})/\omega(\text{Y})$  分类图(图 3(b)) 进行投图, 样品均落在碱性玄武岩区内。

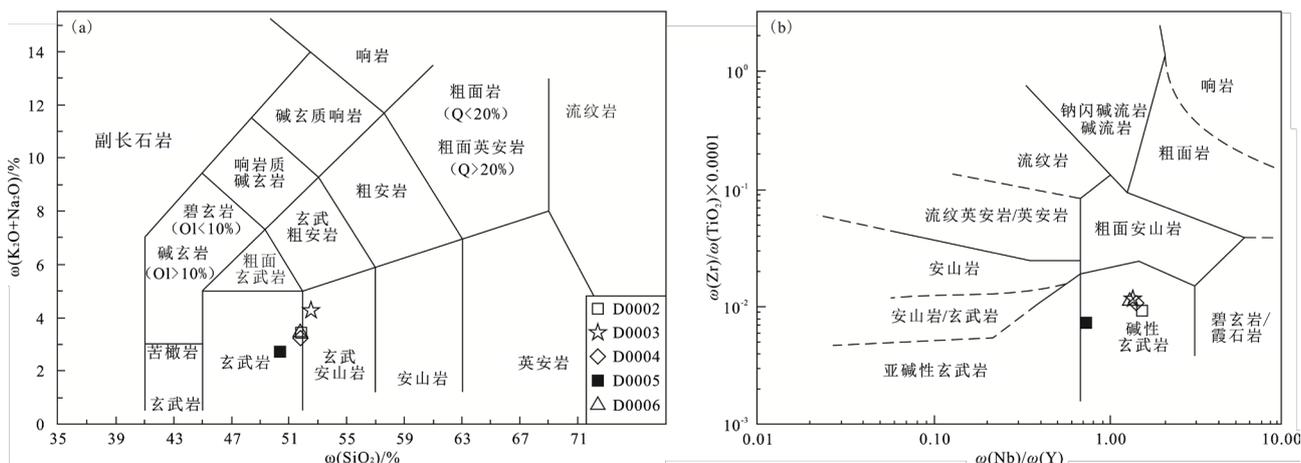
##### 4.2. 稀土元素地球化学特征

由稀土元素测试结果(表 2)可知, 玄武岩具有较高的稀土质量分数( $\omega(\Sigma\text{REE}) = 272.71 \times 10^{-6} \sim 331.32 \times 10^{-6}$ , 均值为  $274.65 \times 10^{-6}$ ), 稀土元素球粒陨石标准化型式较简单(球粒陨石标准化数据引自文献[12]), 所有样品都表现出一致的 LREE 富集的右倾型分布模式, 与 OIB 玄武岩相似(图 4)。 $\omega(\text{LREE})$  为  $134.56 \times 10^{-6} \sim 296.52 \times 10^{-6}$ ,  $\omega(\text{HREE})$  为  $21.89 \times 10^{-6} \sim 34.80 \times 10^{-6}$ ,  $\omega(\text{LREE})/\omega(\text{HREE})$  较低, 为 6.15~8.82 (平均为 8.19),  $(\omega(\text{La})/\omega(\text{Yb}))_{\text{N}}$  (N 表示相应元素质量分数的球粒陨石标准化)为 7.33~12.54,  $(\omega(\text{Gd})/\omega(\text{Yb}))_{\text{N}}$  为 2.06~2.96, 表明 LREE 和 HREE 分异作用明显, LREE 发生明显富集。 $\delta\omega(\text{Eu})$  为 0.88~0.96, 具轻微 Eu

**Table 1.** Major element composition and relevant parameter value of basalt of Nanhong agate orefield in Meigu county  
**表 1.** 美姑县南红玛瑙矿区玄武岩主要元素分析结果及其参数值

项目	D0002	D0003	D0004	D0005	D0006
$\omega(\text{SiO}_2)/\%$	51.87	52.51	51.77	50.33	51.70
$\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	13.38	13.40	13.31	13.10	13.30
$\omega(\text{CaO})/\%$	9.32	5.72	7.45	9.81	7.90
$\omega(\text{TFe}_2\text{O}_3)/\%$	13.44	15.35	14.86	15.84	14.51
$\omega(\text{TFeO})/\%$	12.09	13.81	13.37	14.25	13.06
$\omega(\text{K}_2\text{O})/\%$	1.72	1.58	0.61	0.58	0.92
$\omega(\text{MgO})/\%$	3.60	3.65	4.39	4.94	3.91
$\omega(\text{MnO})/\%$	0.19	0.21	0.26	0.22	0.21
$\omega(\text{Na}_2\text{O})/\%$	1.68	2.67	2.63	2.16	2.63
$\omega(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	0.47	0.58	0.57	0.26	0.58
$\omega(\text{TiO}_2)/\%$	4.08	3.92	3.90	2.64	3.87
$\omega(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\%$	3.40	4.25	3.24	2.74	3.55
$\text{Mg}^\#$	34.64	32.01	36.90	38.17	34.79

注:  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  和  $\text{TFeO}$  为全铁的两表达形式,  $\omega(\text{TFeO})\% = \omega(\text{TFe}_2\text{O}_3)\% * 0.8998$ ;  $\text{Mg}^\# = 100 \times (\text{MgO}/40.31)/(\text{MgO}/40.31 + \text{TFeO}/71.85)$ 。



**Figure 3.** TAS and  $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{TiO}_2)$  versus  $\omega(\text{Nb})/\omega(\text{Y})$  diagrams of basalt of Nanhong agate orefield in Meigu county

**图 3.** 美姑县南红玛瑙矿区玄武岩 TAS 分类图[10]和  $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{TiO}_2)-\omega(\text{Nb})/\omega(\text{Y})$ 图解[11]

负异常; 样品显示轻微 Ce 正异常( $\delta\omega(\text{Ce}) = 1.01\sim 1.05$ )。

### 4.3. 微量元素地球化学特征

玄武岩样品富集 Rb、Ba 和 Th 等大离子亲石元素, 无明显 Nb 和 Ta 异常, 且具有较高的  $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{Yb})$  比值(72.06~135.97), 显示洋岛玄武岩的地球化学特征[13]。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图(原始地幔微量元素标准化数据引自文献[14]) (图 5)上, 其分布特征与典型的岛弧火山岩和洋中脊火山岩均有很大区别, 而与洋岛玄武岩(OIB)的配分模式类似。

**Table 2.** Trace and rare earth elements composition of basalt of Nanhong agate orefield in Meigu county  
**表 2.** 美姑县南红玛瑙矿区玄武岩微量、稀土元素组成

项目	D0002	D0003	D0004	D0005	D0006
$\omega(\text{Rb})/10^{-6}$	62.40	63.90	17.20	17.30	17.00
$\omega(\text{Ba})/10^{-6}$	774.00	858.00	336.00	333.00	564.00
$\omega(\text{Th})/10^{-6}$	7.18	8.74	7.68	4.12	8.19
$\omega(\text{U})/10^{-6}$	1.89	2.01	1.78	0.99	2.00
$\omega(\text{K})/10^{-6}$	14,292.00	13,145.00	5103.00	4786.00	7604.00
$\omega(\text{Ta})/10^{-6}$	2.30	2.80	2.80	1.30	2.70
$\omega(\text{Nb})/10^{-6}$	37.70	45.10	41.80	22.00	44.00
$\omega(\text{La})/10^{-6}$	47.80	59.40	52.10	27.80	57.10
$\omega(\text{Ce})/10^{-6}$	111.50	134.50	120.50	60.10	128.00
$\omega(\text{Sr})/10^{-6}$	499.00	551.00	628.00	410.00	609.00
$\omega(\text{Nd})/10^{-6}$	56.80	67.80	62.50	30.20	64.50
$\omega(\text{P})/10^{-6}$	2033.00	2541.00	2504.00	1148.00	2532.00
$\omega(\text{Zr})/10^{-6}$	378.00	421.00	396.00	196.00	413.00
$\omega(\text{Hf})/10^{-6}$	9.00	10.50	9.10	4.90	9.80
$\omega(\text{Sm})/10^{-6}$	11.95	14.25	13.30	6.96	13.95
$\omega(\text{Ti})/10^{-6}$	23,597.00	22,578.00	22,748.00	15,427.00	21,984.00
$\omega(\text{Y})/10^{-6}$	35.10	42.90	39.50	30.20	42.00
$\omega(\text{Yb})/10^{-6}$	2.78	3.60	2.98	2.72	3.41
$\omega(\text{Lu})/10^{-6}$	0.40	0.50	0.47	0.41	0.47
$\omega(\text{Pr})/10^{-6}$	13.70	16.50	14.90	7.32	15.50
$\omega(\text{Eu})/10^{-6}$	3.19	4.07	3.58	2.18	3.85
$\omega(\text{Gd})/10^{-6}$	9.74	12.60	10.65	6.78	11.55
$\omega(\text{Tb})/10^{-6}$	1.43	1.75	1.57	0.98	1.65
$\omega(\text{Dy})/10^{-6}$	7.65	9.49	8.64	6.02	9.11
$\omega(\text{Ho})/10^{-6}$	1.43	1.74	1.58	1.24	1.66
$\omega(\text{Er})/10^{-6}$	3.86	4.53	3.91	3.27	4.25
$\omega(\text{Tm})/10^{-6}$	0.48	0.59	0.52	0.47	0.56
$\omega(\text{Ce})/\omega(\text{Yb})$	40.11	37.36	40.44	22.10	37.54
$\omega(\Sigma\text{REE})$	272.71	331.32	297.2	156.45	315.56
$\omega(\text{LREE})$	244.94	296.52	266.88	134.56	282.90
$\omega(\text{HREE})$	27.77	34.80	30.32	21.89	32.66
$\omega(\text{LREE}/\text{HREE})$	8.82	8.52	8.80	6.15	8.66
$(\omega(\text{La})/\omega(\text{Yb}))_{\text{N}}$	12.33	11.84	12.54	7.33	12.01
$(\omega(\text{Gd})/\omega(\text{Yb}))_{\text{N}}$	2.90	2.90	2.96	2.06	2.80
$\delta\omega(\text{Eu})$	0.88	0.91	0.89	0.96	0.90
$\delta\omega(\text{Ce})$	1.05	1.04	1.05	1.01	1.04

注:  $\omega(\text{K})/10^{-6} = \omega(\text{K}_2\text{O})\% * 10,000 * 0.83013$ ,  $\omega(\text{P})/10^{-6} = \omega(\text{P}_2\text{O}_5)\% * 10,000 * 0.43646$ 。

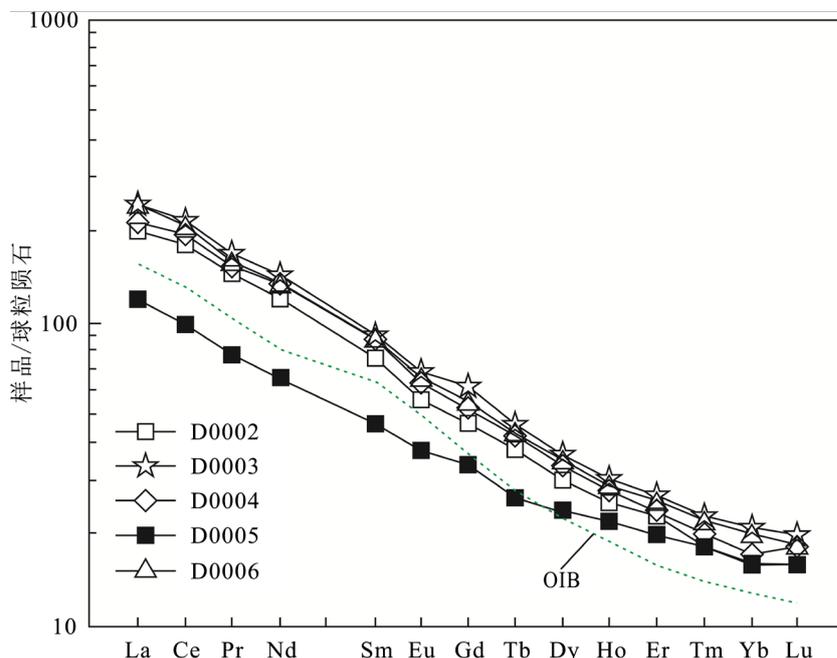


Figure 4. Chondrite-normalized REE distribution pattern of basalt of Nanhong agate orefield in Meigu county  
 图 4. 美姑县南红玛瑙矿区玄武岩稀土元素球粒陨石标准化配分图

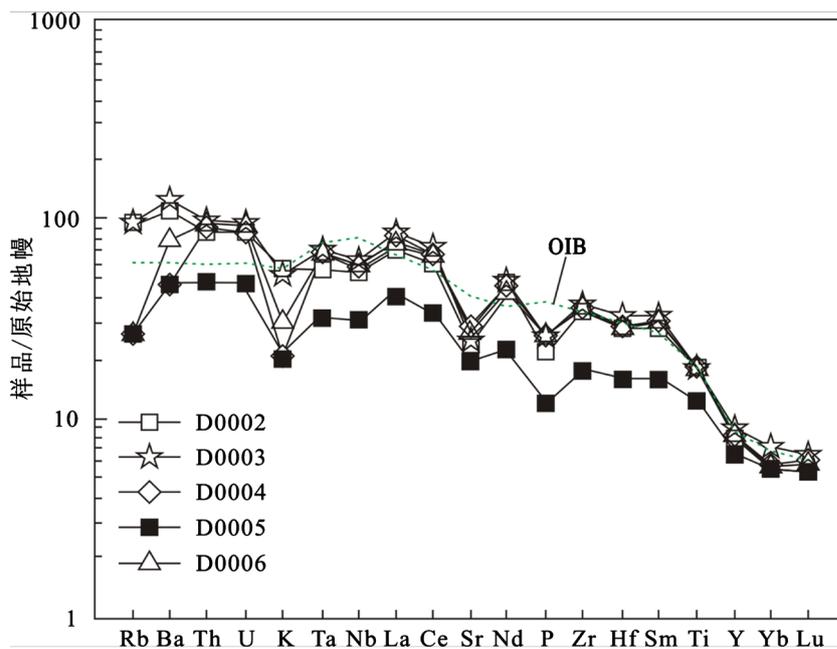


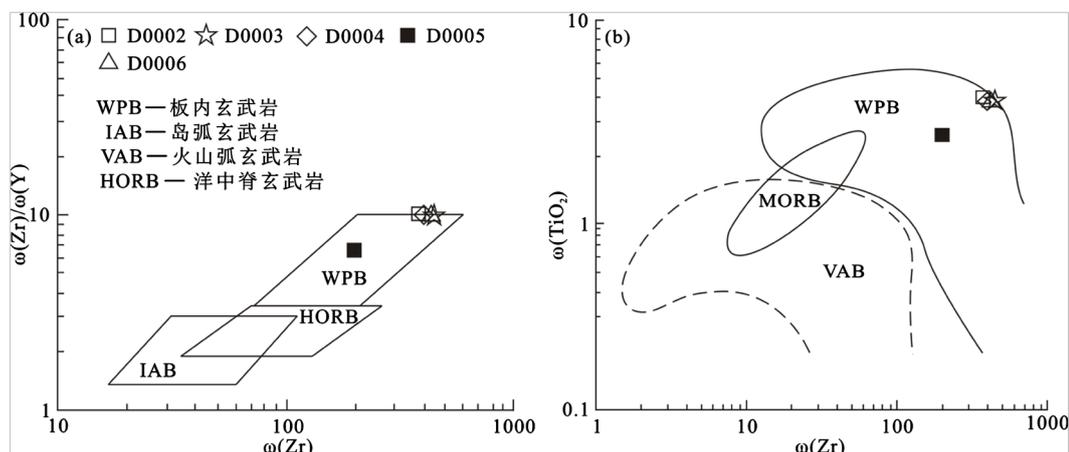
Figure 5. Primitive mantle-standardized trace element pattern of basalt of Nanhong agate orefield in Meigu county  
 图 5. 美姑县南红玛瑙矿区玄武岩微量元素原始地幔标准化蛛网图

## 5. 讨论

### 5.1. 构造环境

考虑到矿区玄武岩有不同程度的蚀变, 在开展成岩构造环境研究时, 除利用岩石主量元素外, 特别选用一些在蚀变和变质过程中相对稳定的微量元素进行判别[15]。Zr 和 Y 为不活泼元素,  $TiO_2$  是比较惰

性的组分,受蚀变和变质影响较小,是指示成岩构造环境的有效指标。在 $\omega(\text{TiO}_2)$ - $\omega(\text{Zr})$ 和 $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{Y})$ - $\omega(\text{Zr})$ 大地构造环境判别图解(图 6(a)、图 6(b))中,矿区玄武岩均位于板内玄武岩区。



**Figure 6.**  $\omega(\text{TiO}_2)$  versus  $\omega(\text{Zr})$  and  $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{Y})$  versus  $\omega(\text{Zr})$  discriminant diagram of tectonic setting of basalt of Nanhong agate orefield in Meigu county

**图 6.** 美姑县南红玛瑙矿区玄武岩构造背景  $\omega(\text{TiO}_2)$ - $\omega(\text{Zr})$  [17]与  $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{Y})$ - $\omega(\text{Zr})$  [18]判别图

板内玄武岩一般包括洋岛玄武岩和大陆玄武岩,其发育位置分别为大洋地壳和大陆地壳。根据 Chayes 关于一般玄武岩的构造环境判别函数,即“经验大洋系数”—— $OK = \text{MgO} + 2\text{TiO}_2 - 3\text{K}_2\text{O}$  ( $OK = 2\sim 7.7$  为大陆玄武岩;  $8\sim 9.5$  为裂谷系玄武岩和大陆斜长玄武岩;  $10\sim 13$  为大洋玄武岩) [16]。本文样品  $OK$  值介于  $6.59\sim 10.35$  之间,因而具有大陆玄武岩和裂谷系玄武岩的双重特征。

综上所述,美姑县南红玛瑙矿区碱性玄武岩形成于大陆板内拉张环境,为板内大陆裂谷构造背景,可能与康滇裂谷带形成有关。

## 5.2. 岩石成因

矿区玄武岩样品  $\omega(\text{TiO}_2)$  为  $2.64\%\sim 4.08\%$ ,  $\omega(\text{Ti})/\omega(\text{Y})$  为  $511\sim 672$ , 与峨眉山玄武岩东岩区高钛特征一致 [19]。玄武岩样品的  $\omega(\text{MgO})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Ni})$  和  $\text{Mg}^\#$  均低于原生岩浆参考值 ( $\omega(\text{MgO})$  为  $10\%\sim 12\%$ ,  $\omega(\text{Cr}) > 1000$  ppm,  $\omega(\text{Ni}) > 400$  ppm,  $\text{Mg}^\#$  为  $68\sim 75$ ) [20] [21] [22] [23], 表明母岩浆并非原始地幔岩浆,而是发生了适度演化后的岩浆 [24]。

不相容元素的分配系数 ( $D$ )  $< 1$ , 在岩浆结晶时很难进入固相,常富集在液相中,因而在岩浆上涌过程中发生晶体分离作用时,不相容元素变化极小,其比值与源区比值基本一致,常用于表征源区的特征。 $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{Hf}) = 40.10\sim 43.52$  (平均为  $41.56$ ), 接近原始地幔平均值 ( $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{Hf}) = 33\sim 40$ ) [25], 显示矿区岩浆具有幔源岩浆特征。地壳物质对岩浆的污染方式有两种:一种是岩浆源区富集,一种是在岩浆上涌中受到地壳污染。幔源岩浆的  $\omega(\text{Lu})/\omega(\text{Yb})$  值为  $0.14\sim 0.15$ , 而与陆壳相关的岩浆比值为  $0.16\sim 0.18$  [26]。矿区玄武岩  $\omega(\text{Lu})/\omega(\text{Yb})$  值为  $0.138\sim 0.158 (< 0.16)$ ; 而且其具有高的  $\omega(\text{Nb})/\omega(\text{U})$  平均值为  $22.02$ , 与原始地幔 ( $\omega(\text{Nb})/\omega(\text{U}) = 30$ ) 接近,明显高于地壳 ( $\omega(\text{Nb})/\omega(\text{U}) = 9$ ) [27];  $\omega(\text{La})/\omega(\text{Nb})$  比值为  $1.25\sim 1.32$ , 接近原始地幔的值 ( $0.94$ ), 与典型陆壳岩石的比值 ( $\omega(\text{La})/\omega(\text{Nb}) > 12$ ) 相差较大;  $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{Hf})$  比值 ( $40.00\sim 43.52$ ) 与原始地幔值 ( $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{Hf}) = 36.25$ ) 较接近,因此,说明矿区岩浆起源于地幔源区而没有遭受到明显陆壳物质的混染,且源区发生少部分熔融 [28] [29]。地幔熔融形成的岩浆  $\omega(\text{La})/\omega(\text{Sm})$  值变化区间较小,而受到混染地壳物质时,  $\omega(\text{La})/\omega(\text{Sm})$  比值一般大于  $5$  [30], 本文样品  $\omega(\text{La})/\omega(\text{Sm}) = 3.92\sim 4.17$ ; 大陆地壳一般强

烈亏损 Ta、Nb, 因此当发生地壳混染时, 微量元素蛛网图常表现为 Nb 和 Ta 的明显亏损, 本文样品未见明显的 Nb、Ta 的亏损, 表明矿区玄武岩岩浆未受到强烈的地壳混染。来自地幔柱的岩浆具有低的  $\omega(\text{La})/\omega(\text{Ta})$  比值(8~15), 而受地壳混染后的岩浆的  $\omega(\text{La})/\omega(\text{Ta})$  比值一般大于 25 [31], 本文样品  $\omega(\text{La})/\omega(\text{Ta}) = 18.61\sim 21.38$ , 低于 25, 说明未受到地壳混染, 其比值高于 15 可能是由于源区混染造成的。由表 3 可知, 矿区玄武岩与 EM-1 洋岛玄武岩最为相近, 说明其起源与 EM-1 洋岛玄武岩起源类似, 应为富集型上地幔, 且与地幔柱的活动有关。

**Table 3.** Characteristics of incompatible elements ratio of basalt of Nanhong agate orefield in Meigu county  
**表 3.** 美姑南红玛瑙矿区玄武岩不相容元素比值特征[32]

元素比值	$\omega(\text{Zr})/\omega(\text{Nb})$	$\omega(\text{La})/\omega(\text{Nb})$	$\omega(\text{Ba})/\omega(\text{Nb})$	$\omega(\text{Ba})/\omega(\text{Th})$	$\omega(\text{Rb})/\omega(\text{Nb})$
原始地幔	14.8	0.94	9	77	0.91
N-MORB	30	1.07	4.3	60	0.36
大陆地壳	16.2	2.2	54	124	4.7
HIMU OIB	3.2~5.0	0.66~0.77	4.9~6.5	49~77	3.2~0.38
EM-1 OIB	5.0~13.1	0.86~1.19	11.4~17.8	103~154	0.88~1.17
EM-2 OIB	4.5~7.3	0.97~1.09	7.3~11.0	64~84	0.59~0.85
OIB	5.83	0.77	—	—	0.65
本文样品	8.91~10.03	1.25~1.32	8.04~20.53	43.75~107.80	0.39~1.66
元素比值	$\omega(\text{K})/\omega(\text{Nb})$	$\omega(\text{Th})/\omega(\text{Nb})$	$\omega(\text{Th})/\omega(\text{La})$	$\omega(\text{Ba})/\omega(\text{La})$	
原始地幔	323	0.117	0.125	9.6	
N-MORB	296	0.071	0.067	4.0	
大陆地壳	134	10.44	0.204	25	
HIMU OIB	77~179	0.080~0.101	0.107~0.133	6.8~8.7	
EM-1 OIB	213~432	0.105~0.122	0.107~0.128	13.2~16.9	
EM-2 OIB	248~378	0.111~0.157	0.122~0.163	8.3~11.3	
OIB	—	0.08	0.11	9.46	
本文样品	125~378.75	0.18~0.19	0.14~0.15	6.45~16.19	

综上所述, 美姑县南红玛瑙矿区玄武岩起源于地幔源区且仅受到轻度的源区混染, 玄武岩的部分壳源组分特征继承自地幔原岩, 而非岩浆在上升过程中受到地壳物质混染所致。

在微量元素蛛网图(图 5)上, 大多数样品的强亲岩浆元素 Th、U、Nb、Ta、Zr、Hf 分布集中, 表明其来源于同一岩浆源区, 并经历了相似的岩浆演化过程[33], D0005 样品的强亲岩浆元素分布稍显离散, 但其岩浆演化趋势与其它样品相似, 说明其离散原因可能与来源于同一源区的不同部位熔融有关。样品 P 的亏损反映源区缺少磷灰石或者熔融程度较低; Sr 的亏损和 Eu 的轻微负异常, 暗示存在斜长石的分离结晶; 在 Harker 图解(图 7)中  $\omega(\text{MgO})$  与  $\omega(\text{TiO}_2)$ 、 $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $\omega(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  存在明显的负相关关系, 说明存在辉石的分离结晶作用, 与镜下岩矿鉴定结果相吻合。U 和 Ta、Zr、Th 等高场强元素的富集和 Y 的轻微亏损, 暗示其可能来源于富集型地幔[31]。因此, 矿区玄武岩岩浆起源于上地幔, 这与峨眉山玄武岩源区直接来自源于上地幔部分熔融的观点一致[33] [34]。

上地幔物质通常是由尖晶石橄榄岩和石榴石橄榄岩相构成的, 采用  $\omega(\text{La})/\omega(\text{Sm})-\omega(\text{Sm})/\omega(\text{Yb})$  图解

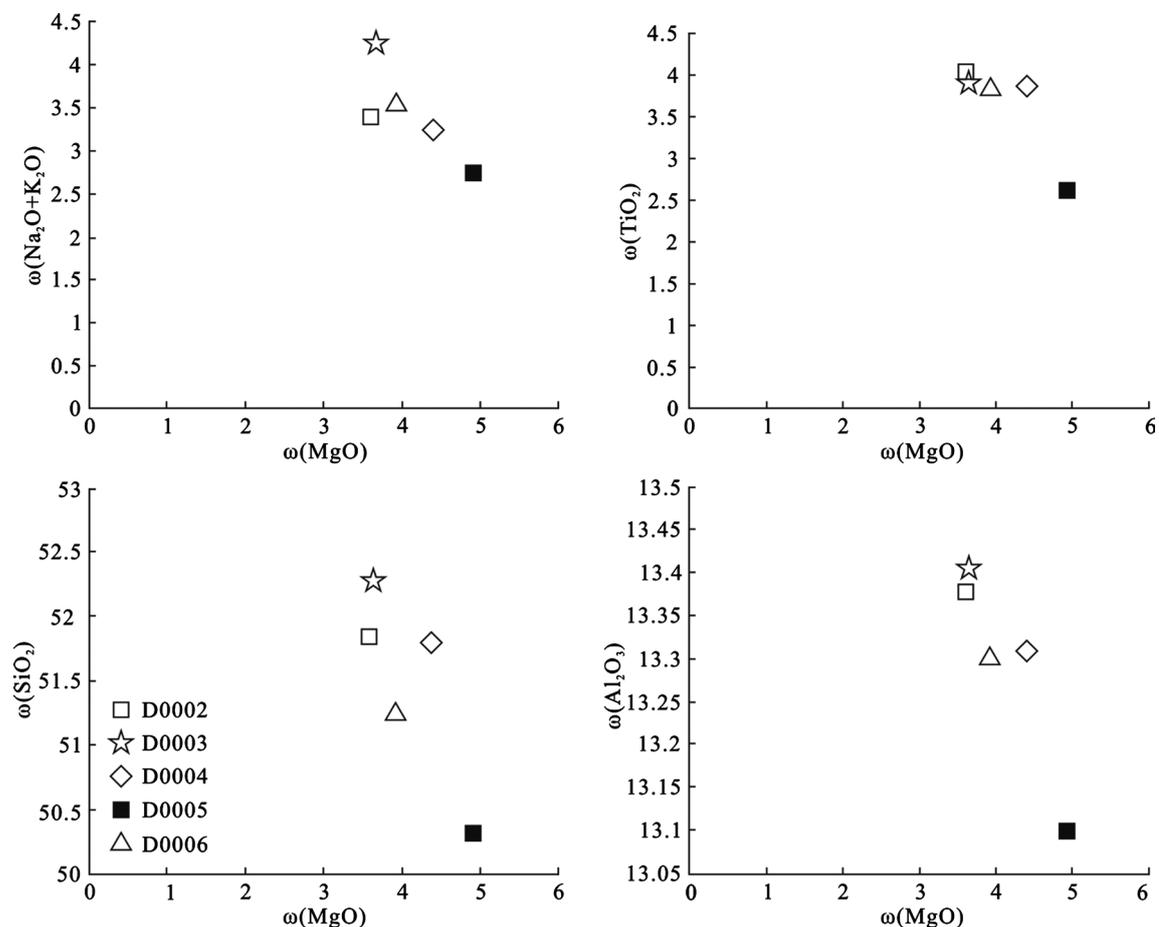
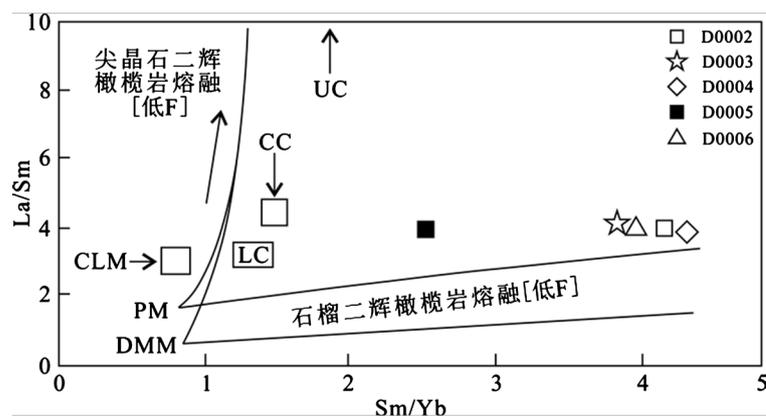


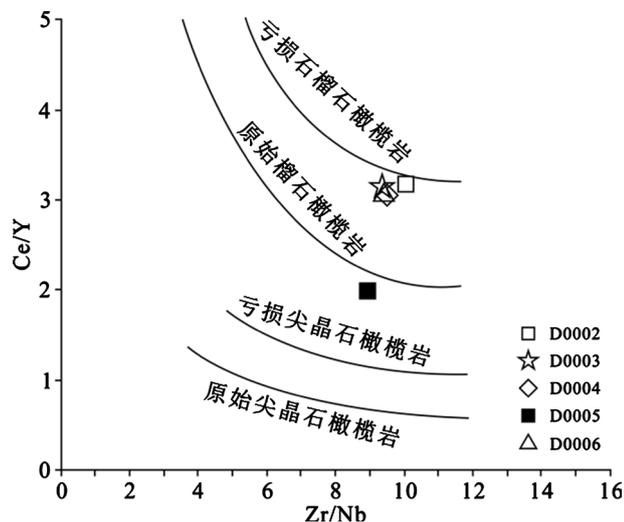
Figure 7. Harker diagram of basalt of Nanhong agate orefield in Meigu county  
图 7. 美姑县南红玛瑙矿区玄武岩哈克图解



PM——原始地幔; DMM——亏损性地幔; CLM——大陆岩石圈地幔; LC——下地壳; CC——整个地壳; UC——上地壳

Figure 8.  $\omega(\text{La})/\omega(\text{Sm})$  versus  $\omega(\text{Sm})/\omega(\text{Yb})$  diagram of basalt of Nanhong agate orefield in Meigu county  
图 8.  $\omega(\text{La})/\omega(\text{Sm})$ - $\omega(\text{Sm})/\omega(\text{Yb})$ 图解

[35]和 $\omega(\text{Ce})/\omega(\text{Y})$ - $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{Nb})$ 图解[36]判别矿区玄武岩上地幔源区的物质起源,从图8和图9可以看出,大多数样品(D0005除外)集中于石榴石二辉橄榄岩熔融区内, D0005样品处于石榴石二辉橄榄岩与尖晶石辉橄榄岩过渡区内。 $\omega(\text{Ce})/\omega(\text{Yb})$ 比值高表明熔融程度低或主要残留相为石榴石[37],本文样品 $\omega(\text{Ce})/\omega(\text{Yb})$



**Figure 9.**  $\omega(\text{Ce})/\omega(\text{Y})$  versus  $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{Nb})$  diagram of basalt of Nanhong agate orefield in Meigu county  
**图 9.**  $\omega(\text{Ce})/\omega(\text{Y})$ - $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{Nb})$ 图解

= 22.10~40.44(均值为 35.51), 具有变化区间大、均值高的特点, 说明矿区玄武岩源区为石榴石稳定区, 变化区间大, 进一步表明具有向尖晶石过渡的特征。

因此, 美姑县南红玛瑙矿区玄武岩是由石榴石二辉橄榄岩地幔部分熔融形成的, 且具有石榴石稳定区向尖晶石稳定区过渡的特征, 并伴随有斜长石、辉石的分离结晶作用。

峨眉山玄武岩西区(云南宾川)的玄武岩最厚可达 5384 m [38], 该区及其邻区产出少量能够代表原生岩浆的苦橄岩[39], 被视为地幔柱轴部。美姑县南红玛瑙矿区玄武岩厚约 800 m, 远离地幔柱轴部, 可能形成于地幔热柱边部熔融或地幔热柱活动尾声。

## 6. 结论

1) 美姑县南红玛瑙矿区玄武岩为碱性玄武岩。具有  $\text{TiO}_2$  含量高, REE 总量高, 轻重稀土分异作用明显, 富集大离子亲石元素(Rb、Ba 和 Th)、Nb、Ta 等高场强元素无明显异常, 相对亏损 K、P、Sr 等元素的特点, 地球化学特征和微量元素分布型式与标准洋岛型玄武岩、高钛峨眉山玄武岩相似。

2) 地球化学判别图解显示美姑县南红玛瑙矿区玄武岩应形成于大陆板内拉张环境, 美姑县南红玛瑙矿区玄武岩岩浆起源于地幔源区且仅受到轻度的源区混染, 其部分壳源组分特征继承自地幔原岩, 而非岩浆在上升过程中受到地壳物质混染所致; 岩浆可能来自于富集地幔, 并与石榴石二辉橄榄岩部分熔融有关, 且具有石榴石稳定区向尖晶石稳定区过渡的特征, 并伴随有斜长石、辉石的分离结晶。

3) 美姑县南红玛瑙矿区玄武岩为地幔柱成因, 且远离地幔柱轴部, 可能形成于地幔热柱边部熔融或地幔热柱活动尾声。

## 基金项目

本文得到西南科技大学大学生创新创业训练计划项目(S201910619047); 西南科技大学博士基金项目(18zx712201); 西南科技大学学科建设软科学研究项目(18sxb08501)联合资助。

## 参考文献

- [1] 熊见竹, 余晓艳, 奥岩. 四川凉山联合乡南红玛瑙的宝石学特征及颜色成因探究[J]. 宝石和宝石学杂志, 2015, 17(3): 10-18.

- [2] 熊见竹. 四川凉山州南红玛瑙的宝石矿物学特征研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2015: 1-75.
- [3] 林礼. 凉山南红玛瑙的宝石学和岩石学特征分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2016: 1-56.
- [4] 代司晖, 申柯娅. 四川凉山南红玛瑙与非洲南红玛瑙的宝石学特征[J]. 宝石和宝石学杂志, 2016, 18(4): 22-27.
- [5] 傅秋莹. 凉山州南红玛瑙致色元素与成矿环境的研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2015: 1-46.
- [6] 张春双. 四川凉山美姑地区南红玛瑙的致色机理研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2016: 1-58.
- [7] 张珏. 凉山美姑南红玛瑙矿床地质特征与控矿因素分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2016: 1-36.
- [8] 覃建雄, 夏竹, 张长俊, 等. 西昌复合盆地层序充填序列与沉积动力演化初探[J]. 古地理学报, 2011, 3(4): 45-55.
- [9] 耿全如, 潘桂棠, 金振民, 等. 西藏冈底斯带叶巴组火山岩地球化学及成因[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2005, 30(6): 747-760.
- [10] Le Maitre, W., Bateman, P., Dudek, A., *et al.* (1989) A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. Blackwell, Oxford, 206.
- [11] Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G. (1984) Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, **25**, 956-983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- [12] Boynton, W.V. (1984) Geochemistry of the Rare Earth Elements Meteorite Studies. In: Henderson, P., Ed., *Rare Earth Element Geochemistry*, Elsevier, Amsterdam, 63-114. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>
- [13] Weaver, B.L. (1991) Trace Element Evidence for the Origin of Ocean-Island Basalts. *Geology*, **19**, 123-126. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0123:TEEFTO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0123:TEEFTO>2.3.CO;2)
- [14] Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989) Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A.D. and Norry, M.J., Eds., *Magmatism in the Ocean Basins*, Geological Society Special Publication, London, 313-345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- [15] 朱余银, 王天国, 黄超文, 等. 新疆东天山金滩金矿区安山岩岩石学、地球化学及地质意义[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(10): 2697-2708.
- [16] 熊舜华, 李建林. 峨眉山地区晚二叠世大陆裂谷边缘玄武岩系的特征[J]. 成都地质学院学报, 1984, 12(3): 43-58.
- [17] Pearce, J.A. (1982) Trace Element Characteristics of Lavas from Destructive Plate Boundaries. In: *Andesites*, John Wiley Sons, New York, 160-170.
- [18] Pearce, J.A. and Norry, M.J. (1979) Petrogenetic Implications of Ti, Zr, Y, and Nb Variations in Volcanic Rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **69**, 33-47. <https://doi.org/10.1007/BF00375192>
- [19] 徐义刚, 钟孙霖. 峨眉山大火成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件[J]. 地球化学, 2001, 30(1): 1-9.
- [20] Wendland, R.F., Altherr, R.R., Nuemann, E.R., *et al.* (1995) Petrology, Geochemistry, Isotopes. In: Olsen, K.H., Ed., *Continental Rifts: Evolution, Structures, Tectonics*, Elsevier, Amsterdam, 47-60.
- [21] Frey, F.A., Green, D.H. and Roy, S.D. (1978) Integrated Models of Basalt Petrogenesis: A Study of Quartz Tholeiites to Olivine Melilitites from Southeastern Australia Utilizing Geochemical and Experimental Petrological Data. *Journal of Petrology*, **19**, 463-513. <https://doi.org/10.1093/petrology/19.3.463>
- [22] 侯增谦, 汪云亮, 张成江, 宋谢炎. 峨眉火成岩省地幔热柱的主要元素及 Cr、Ni 地球化学特征[J]. 地质论评, 1999, 45(7): 880-884.
- [23] Frey, F.A. and Prinz, M. (1978) Ultramafic Inclusions from San Carlos, Arizona: Petrologic and Geochemical Data Bearing on Their Petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, **38**, 129-176. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(78\)90130-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(78)90130-9)
- [24] 高林, 陈斌. 鲁西地块济南辉长岩岩石学、地球化学和 Os-Nd-Sr 同位素研究[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(2): 19-31.
- [25] Green, T.H. (1995) Significance of Nb/Ta as Indicator of Geochemical Processes in the Crust-Mantle System. *Chemical Geology*, **120**, 347-359. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00145-X](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00145-X)
- [26] Rudnick, R. and Gao, S. (2003) Composition of the Continental Crust. In: Rudnick, R.L., Ed., *Treatise on Geochemistry (Volume 3)*, Elsevier-Pergamon, Oxford, 1-64. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03016-4>
- [27] Hofman, A.W., Jochum, K.P. and Seufert, M. (1986) Nd and Pb in Oceanic Basalts: New Constrains on Mantle Evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, **79**, 33-45. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(86\)90038-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(86)90038-5)
- [28] Rudnick, R.L. and Fountain, D.M. (1995) Nature and Composition of the Continental Crust: A Lower Crustal Perspective. *Review of Geophysics*, **33**, 267-309. <https://doi.org/10.1029/95RG01302>
- [29] 段其发, 王建雄, 白云山, 等. 唐古拉山东段莫云地区二叠纪玄武岩地球化学特征及源区性质[J]. 岩石矿物学杂志, 2010(2): 15-28.

- 
- [30] Lassiter, J.C. and DePaolo, D.J. (1997) Plume/Lithosphere Interaction in the Generation of Continental and Oceanic Flood Basalts: Chemical and Isotopic Constraints. *Geophysical Monograph American Geophysical Union*, **100**, 335-356. <https://doi.org/10.1029/GM100p0335>
- [31] 吕劲松, 肖渊甫, 邓江红, 等. 滇西北峨眉山玄武岩与冈达组下段玄武岩对比研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2013, 32(1): 75-91.
- [32] Weaver, B.L. (1991) The Origin of Ocean Island Basalt End-Member Composition: Trace Element and Isotopic Constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, **104**, 381-397. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90217-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90217-6)
- [33] 汪云亮, 李巨初, 王旺章. 微量元素丰度模式与峨眉山玄武岩成因[J]. 矿物岩石, 1989, 9(4): 100-105.
- [34] 严再飞, 黄智龙, 许成, 等. 峨眉山二滩玄武岩地球化学特征[J]. 矿物岩石, 2006, 26(3): 79-86.
- [35] 张招崇, 王福生, 郝艳丽. 峨眉山大火成岩省中的苦橄岩: 地幔柱活动证据[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, 24(1): 19-24.
- [36] 姜寒冰. 峨眉山高钛和低钛玄武岩的岩石成因[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2006: 1-60.
- [37] 马健飞, 沙小保, 刘建清, 等. 盐津地区峨眉山玄武岩地球化学特征及成因分析[J]. 矿物岩石, 2019, 39(2): 25-33.
- [38] 张云湘, 骆耀南, 杨崇喜, 等. 攀西裂谷[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1-325.
- [39] 姜常义, 钱壮志, 姜寒冰, 等. 云南宾川-永胜-丽江地区低钛玄武岩和苦橄岩的岩石成因与源区性质[J]. 岩石学报, 2007, 23(4): 777-792.