

# 滇东-黔西地区峨眉山玄武岩 Nb-Ga-REE 富集机制及赋存状态初步研究

陈琦<sup>1,2</sup>, 于宋月<sup>1\*</sup>, 温汉捷<sup>1</sup>, 蓝江波<sup>1</sup>, 罗重光<sup>1</sup>

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, 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 滇东-黔西地区的宣威组底部广泛发育一套 Nb-Ga-REE 多金属矿化富集层, 其底板为峨眉山玄武岩。为探讨峨眉山玄武岩与该矿化层的成因联系, 对玄武岩进行了主、微量元素分析测试, 对 Nb、Ga、REE 的富集机制及赋存状态进行了研究。结果表明, 与其他地区相比, 滇东-黔西地区峨眉山玄武岩的 P、Ti 含量高且富集 REE、Nb、Ga 等成矿元素, 这与橄榄石、辉石、斜长石等矿物的大量分离结晶有关。另外, 玄武岩喷发后的冷凝过程中单斜辉石、斜长石、Fe-Ti 氧化物快速结晶, 从而导致仅占基质 10%~30% 的磷灰石、榍石及隐晶质/玻璃质高度富集 REE、Nb、Zr、Ga 等成矿元素。这些矿物在后期风化淋滤过程中形成黏土矿物, 成为宣威组底部 Nb-Ga-REE 多金属矿化富集层的主要成矿物质来源。

**关键词:** Nb-Ga-REE; 峨眉山玄武岩; 滇东-黔西; 岩浆演化; 地幔柱

中图分类号: P581 文章编号: 1007-2802(2020)06-1256-22 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2020.39.069

## A Preliminary Study on the Possible Mechanism of Enrichment and Occurrence State of Nb-Ga-REE in the Emeishan Basalts from the Diandong-Qianxi Region

CHEN Qi<sup>1,2</sup>, YU Song-yue<sup>1\*</sup>, WEN Han-jie<sup>1</sup>, LAN Jiang-bo<sup>1</sup>, LUO Chong-guang<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** An Nb-Ga-REE mineralized layer widely occurred in the bottom part of the Xuanwei formation within the Diandong-Qianxi area. Its floor is the Emeishan basalt. In order to discuss the possible role of the basal Emeishan basalts to the generation of this Nb-Ga-REE mineralized layer, a preliminary study on the possible mechanism of enrichment and occurrence state of Nb-Ga-REE in the Emeishan basalts from the Diandong-Qianxi region has been carried out in this paper. The results show that the Emeishan basalts from the Diandong-Qianxi region are relatively enriched in P, Ti, and ore-forming elements of REE, Nb, and Ga, compared with those from other areas. The enrichment of P, Ti, REE, Nb and Ga could be attributed to the fractional crystallization of a large amount of olivine, pyroxene and plagioclase. In addition, the fast crystallization of plagioclase, clinopyroxene, and Fe-Ti oxides during the magma cooling after eruption results in the high enrichment of ore-forming elements including REE, Nb, Zr, and Ga in apatite, sphene and glass, which are only 10 to 30% out of the total matrix of basalt. These minerals may be weathered to clay minerals during later weathering and leaching process to become the main source of ore-forming materials of the Nb-Ga-REE mineralized layer in the bottom part of Xuanwei formation.

**Key words:** Nb-Ga-REE; Emeishan basalt; Diandong-Qianxi; magma evolution; mantle plume

收稿编号: 2020-074 2020-05-30 收到 2020-06-29 改回

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFC0600502); 南方海洋科学与工程广东省实验室重大专项团队项目(GML2019ZD0202); 国家自然科学基金项目(41573009); 中国科学院西部青年学者 A 类项目; 贵州省科学技术基金(黔科合 J 字[2010]2033)

第一作者简介: 陈琦(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 地球化学。E-mail: chenqi@mail.gyig.ac.cn.

\* 通信作者简介: 于宋月(1979-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 基性-超基性岩。E-mail: yusongyue@mail.gyig.ac.cn.

## 0 引言

Nb-Ga-REE 是关键金属和关键矿产资源的重要组成部分,这些关键矿产包括“三稀”金属(稀有金属:Li、Be、Rb、Cs、Nb、Ta、Zr、Hf、W,稀土金属:La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y、Sc,稀散金属:Ga、Ge、Se、Cd、In、Te、Re、Tl及稀贵金属:PGE、Cr、Co)(翟明国等,2019;蒋少涌等,2019),是新材料、新能源、信息技术、航空航天和尖端武器等新兴产业不可或缺的关键支撑原材料,对国民经济、国家安全和科技发展具有“四两拨千斤”的重要战略意义(陈毓川和王瑞江,2019;蒋少涌等,2019;王登红,2019)。

成矿的一个重要前提是物质基础,关键金属元素的地壳丰度极低,在地幔和地壳中的含量差异很大,成矿需要元素数百乃至上万倍的超常富集,成矿条件十分苛刻(翟明国等,2019;蒋少涌等,2019)。稀有、稀土元素在花岗岩、伟晶岩和幔源碱性岩-碳酸岩中含量很高,这为形成花岗岩型、伟晶岩型、碳酸岩型稀有、稀土矿床奠定了重要的物质基础(蒋少涌等,2019)。而玄武岩中稀有、稀土元素背景值远低于花岗岩和碱性岩中(刘廷良等,1992),很难富集成矿。然而,前人在滇东-黔西峨眉山玄武岩剖面上的高岭石黏土岩中发现 Nb-Ga-REE 超常富集,其中稀土资源储量初步估算为 60 万 t,稀土含量高( $144 \times 10^{-6} \sim 2.288 \times 10^{-6}$ ),并富集 Nb( $116 \times 10^{-6} \sim 663 \times 10^{-6}$ )、Ga( $47 \times 10^{-6} \sim 110 \times 10^{-6}$ )等,是一个分布广泛、工业价值很高的新类型关键金属矿床(杨瑞东等,2006;张正伟等,2010;王伟等,2011;赵平等,2019;杜胜江等,2019)。已有研究认为,这种富 Nb-Ga-REE 的高岭石黏土岩是峨眉山大火成岩省玄武岩的风化沉积产物。黄训华(1997)率先报道了贵州威宁地区峨眉山玄武岩风化壳之上的上二叠统宣威组底部的高岭石黏土岩稀土富集成矿,并认为峨眉山玄武岩为该风化区的母岩,推测稀土元素来自玄武岩母岩中的辉石。杨瑞东等(2006)在贵州赫章二叠系玄武岩顶部风化壳的灰白色高岭石黏土岩中发现很高的稀土总量( $\text{REE}_2\text{O}_3$  为 0.023%~0.22%),是远景储量很大的稀土矿床,并认为是峨眉山玄武岩后期被强烈淋滤风化,稀土元素高度富集并形成类似于江西花岗岩风化形成的风化壳离子吸附型稀土矿床。张正伟等(2010)报道了黔西宣威组底部的碳质页岩富 Ga( $47 \times 10^{-6} \sim 110 \times 10^{-6}$ ),认为其物质来源为峨眉山玄武岩。王伟等(2011)对黔西地区玄武岩风化壳中

稀土矿成矿机理及成矿模式的研究认为,玄武岩高的稀土背景值是稀土富集的重要基础,从岩浆演化开始就出现稀土分馏,后期风化淋滤作用造成稀土的选择性分馏和富集,是玄武岩风化壳稀土成矿的重要条件。杜胜江等(2019)探讨了峨眉山玄武岩与风化壳中 REE、Nb、Ga 的成因联系,发现滇东-黔西的玄武岩主要为高钛玄武岩,并富含榍石,榍石在后期遭受风化蚀变为上覆矿层提供 Nb、Zr、Y、Ce 等成矿元素。上述从物源和成矿机理等方面进行的研究取得了重要进展,但对滇东-黔西峨眉山玄武岩的成分是否具有特殊性缺乏对比研究,对高稀土背景值的原因缺乏认识,对 REE、Nb、Ga 等元素的具体赋存状态还不太清楚。关键问题是,峨眉山玄武岩分布面积巨大,为何迄今报道的只有该地区的玄武岩能够风化沉积成矿?其岩浆性质和矿物组成有何特殊性?是否经历了特殊的岩浆起源和演化过程?因此,厘清滇东-黔西峨眉山玄武岩中 Nb-Ga-REE 的富集机制及赋存状态是解决该区富 Nb-Ga-REE 高岭石黏土岩成矿物质来源的关键。

本文通过对滇东-黔西峨眉山玄武岩系统的微区矿物学和地球化学研究,厘清其 Nb-Ga-REE 的富集规律和赋存状态,为研究玄武岩风化壳型 Nb-Ga-REE 多金属矿床的成矿物质来源提供新思路,进一步完善地幔柱成矿理论。另外,全球不同时代产出有多个陆内大火成岩省(如俄罗斯 Siberia、北美 Columbia River、南美 Paraná-Etendeka 和东非 Ethiopia-Yemen),其玄武岩分布面积都远大于峨眉山大火成岩省(Coffin and Eldholm, 1994)。对玄武岩中 Nb-Ga-REE 富集机制及赋存状态的研究可为上述大火成岩省寻找风化沉积型 Nb-Ga-REE 矿床提供重要的理论基础。

## 1 区域地质背景

峨眉山大火成岩省位于川南-滇东-黔西及广西北部及越南北部局部地区(图1),面积超过 50 万  $\text{km}^2$ 。峨眉山玄武岩的下伏地层为下二叠统茅口组、栖霞组、梁山组,上覆地层为上二叠统(宣威组/龙潭组)及以上地层。峨眉山大火成岩省以溢流玄武岩为主,并伴有镁铁质-超镁铁质侵入岩,长英质侵入岩以及粗面岩、流纹岩等,以及少量火山碎屑岩(张云湘等,1988;徐义刚等,2007)。攀西地区发育与峨眉山玄武岩密切伴生的基性-超基性岩和中酸性侵入岩,具有“三位一体”的特征(张云湘等,1988)。峨眉山玄武岩喷出地表之前,地幔柱隆起造成茅口组灰岩抬升,由于不同区域抬升高度不一

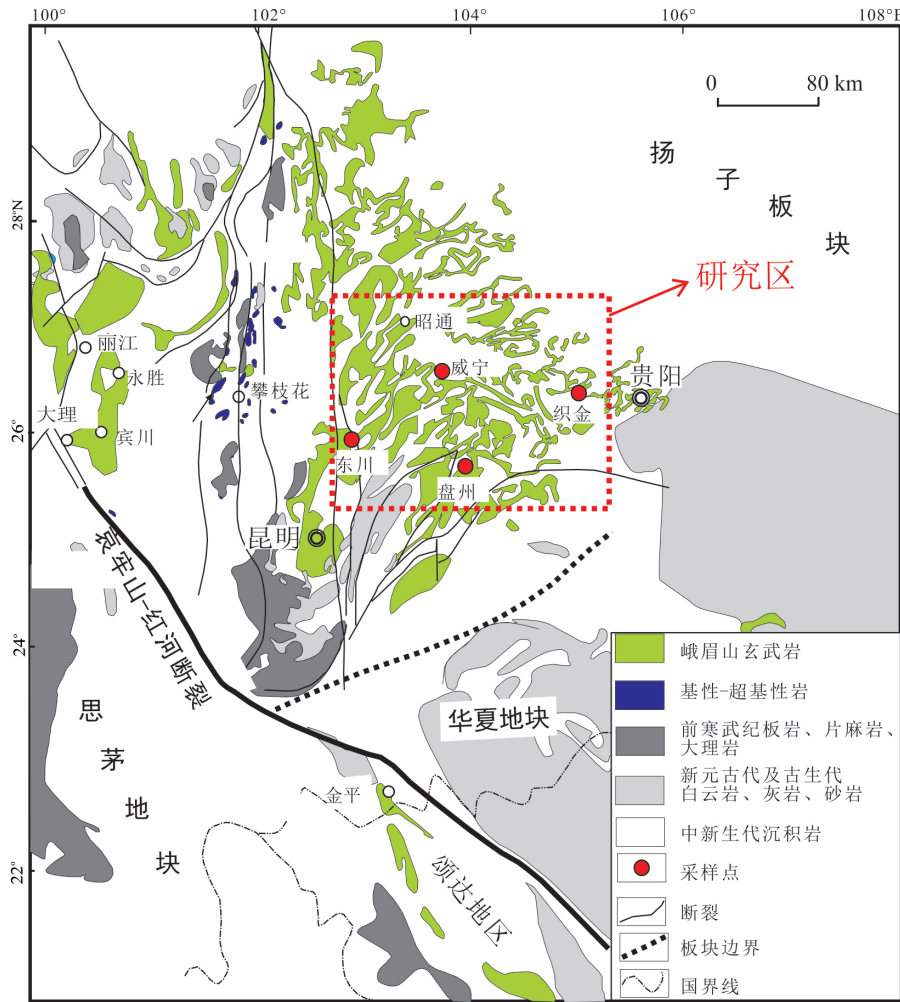


图1 扬子板块西缘峨眉山玄武岩及基性-超基性岩体分布图

Fig.1 The distribution of the Emeishan basalts and mafic-ultramafic intrusions in the western margin of the Yangtze Block

样,灰岩遭风化剥蚀程度也不一样。根据剥蚀厚度,峨眉山大火成岩省可分为内带、中带和外带。其中,内带主要位于云南西部和四川南部,呈近圆形,茅口组灰岩被强烈风化剥蚀,多数地区残留的茅口灰岩厚度只有50 m左右,或直接覆于中二叠统梁山组上。酸性喷出岩及侵入岩只出现在内带的攀枝花-大理地区。中带的茅口组灰岩上段部分被剥蚀,厚度为200~450 m。外带主要位于贵州和四川,茅口组灰岩少有风化剥蚀,厚度为250~600 m。由于地幔柱隆起期间有沉积间断,在峨眉山玄武岩和茅口组灰岩之间常呈不整合接触(徐义刚等,2013)。前人根据 $TiO_2$ 含量和 $Ti/Y$ 值将峨眉山玄武岩分为高钛和低钛两个系列,并认为该玄武岩是苦橄岩浆结晶分异的产物(Xu et al., 2001; Wang et al., 2007; Hanski et al., 2010)。

滇东-黔西地区位于扬子板块西南缘,区域出露地层有:中二叠统茅口组,上二叠统龙潭组、宣威

组和峨眉山玄武岩系,下三叠统飞仙关组、永宁镇组,第四系。峨眉山玄武岩系假整合于茅口组灰岩之上,与上覆龙潭组或宣威组呈假整合接触,其分布区呈东凸的舌形,西厚东薄,其中西部的东川、威宁地区玄武岩厚度超过1000 m,而贵州西部的清镇-福泉一带玄武岩厚度仅10~20 m。滇东-黔西峨眉山玄武岩以拉斑玄武岩为主,含有少量火山碎屑岩、凝灰岩、辉绿岩脉,玄武岩有不同程度的风化蚀变。在峨眉山玄武岩系顶部和宣威组第三段顶部与上二叠统宣威组第一段之间发育一套陆相风化沉积的黏土岩(高岭石黏土岩和凝灰质黏土岩),厚度一般为2~10 m,富集REE、Nb、Zr、Ga等元素。含矿层矿体多为层状,产状与围岩一致。单矿体最长可达300~400 m,厚5~30 cm,平均厚度25 cm。沿走向矿体形态稳定,偶见规模较小(厚度20 cm)的似层状及楔状透镜体。含矿黏土岩中的主要矿物为高岭石和伊利石、蒙脱石,其体积分数(下同)约

占矿物总量的 85% 以上(王伟等, 2011)。

## 2 样品及分析测试方法

本文的 96 个样品采自云南东川、贵州威宁、织金和盘州的玄武岩剖面, 均为致密块状玄武岩。其中, 东川 5 个样品采自会东大桥剖面, 玄武岩厚度约 900 m, 剖面下部为斑状玄武岩夹杏仁状和无斑玄武岩, 中段为斜斑玄武岩以及无斑玄武岩与斜斑玄武岩互层, 上部为无斑玄武岩。威宁 32 个样品采自黑石头和赫章剖面, 以杏仁玄武岩和致密块状玄武岩为主, 夹杂少量火山角砾岩和凝灰岩, 部分层位发育完好的熔岩阶地和柱状节理构造。玄武岩较厚 (>1 000 m), 包括 11 个近平行的岩流, 每个岩流厚薄不均(15~20 m)。盘州 32 个样品采自坪地-四格剖面, 剖面有 15 个岩流, 岩流厚度不均(约 10~15 m), 以致密块状玄武岩为主, 顶部有少量凝灰岩和流纹岩。织金 27 个样品采自熊家场和花贡剖面, 玄武岩较薄(30~60 m), 剖面由 2~3 个岩流组成, 岩流底部为致密块状玄武岩, 上部为杏仁状玄武岩, 顶部为 1 m 厚凝灰岩, 被龙潭组泥页岩覆盖。显微镜下可见, 玄武岩具有间隐结构、拉斑结构、全晶质结构。斑晶为斜长石、普通辉石, 含量为 3%~10%。基质普遍具有拉斑结构, 其次为交织结构和间隐结构, 微晶矿物为斜长石和普通辉石。斜长石微晶架状间隙中的隐晶质/玻璃质约占 20%~40%, 有不同程度的绿泥石化, 斜长石斑晶和微晶有不同程度的钠长石化和高岭石化, 辉石表现为绿帘石化和绿泥石化, 说明该区玄武岩遭受了不同程度的热液蚀变。磁铁矿(3%~5%)呈自形或半自形微粒。

样品的全岩主、微量元素含量, 单矿物的微量元素成分和矿物微区形貌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。

主量元素采用 ARL Perform' X 4200 的 X 射线荧光光谱分析。X 射线管为高性能 Rh, 采用 4.2 kW 固态高频发生器, 工作电压 70 kV、电流 140 nA。首先, 在制备好的 200 目粉末样中加入  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ - $\text{LiBO}_2$  助熔物, 充分混合后在 1 000 °C 熔炉中熔化。熔融物冷却后加入稀  $\text{HNO}_3$  和稀  $\text{HCl}$  溶解, 然后用 X 射线荧光融片法进行定量测试, 相对误差优于 2%。烧失量分析主要是将制备好的定量样品放入马弗炉中, 于 1 000 °C 加热 1 h, 冷却后称重, 样品加热前后的重量差即是烧失百分比(Song et al., 2011)。标样和样品的测试结果见表 1, 国际标样 W-2a 的实测值和推荐值在误差范围内一致。

全岩微量元素采用 Perkin-Elmer Sciex ELAN DRc-e 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测试。称取 50 mg 粉末样放入带不锈钢外套的密封装置中, 加入 1 mL 亚沸蒸馏提纯 HF, 在电热板上蒸干以去掉大部分  $\text{SiO}_2$ , 分别加入 1 mL 和 0.5 mL 亚沸蒸馏提纯 HF 和  $\text{HNO}_3$ , 加盖密封后放入烘箱, 于 185 °C 下加热分解 36 h。冷却后在电热板上于 150 °C 蒸干去除 HF, 然后再加入 1 mL 亚沸蒸馏提纯  $\text{HNO}_3$  再次蒸干, 重复一次全部除去 HF。最后加入 2 mL  $\text{HNO}_3$ 、5 mL 去离子水和 500 ng Rh 内标溶液, 密封放入烘箱中于 140 °C 溶解残渣 8 h, 再取出冷却后吸取其中 400  $\mu\text{L}$  溶液移到 10 mL 离心管中, 加去离子水定容、摇匀, 最后上机测试(Qi et al., 2000)。精度优于 10%。测试结果见表 2, 国际标样 W-2a 的实测值和推荐值在误差范围内一致。

矿物微区形貌采用日产 CJS-7800F 场发射扫描电子显微镜(FESEM), 工作电压 25 kV, 电流 10 nA, 束斑直径为 1  $\mu\text{m}$ 。能谱分析采用美国产 EDAX TEAMApex XL, 分析谱线选择及背景值扣除采用仪器自带程序完成, 分析过程对默认状态下的某些错误谱峰进行人工修正, 最后根据形成的能谱图进行矿物种类鉴别。

主要矿物成分分析采用日产 EMPA-1600 电子探针, 加速电压为 15 kV, 电流 10 nA, 束斑直径 5~10  $\mu\text{m}$ 。标样为美国产的 SPI#2753-AB, 分析精度为 0.01%(Luan et al., 2014)。

单矿物原位微区微量元素分析在 LA-ICP-MS 由 Agilent7700es 四级杆 ICP-MS 连接于 GeoLasPro193 nm 激光剥蚀系统上完成。激光束斑直径为 44  $\mu\text{m}$ , 激光脉冲频率为 6 Hz, 脉冲能量为 0.032~0.105 MJ, 分析时间为 90 s(30 s 空白测试和 60 s 样品分析)。内标为 GSE-1G, 每隔 8 个点分析一次。选用标样 BCR-2G、BHVO-2G、BIR-1G、GSE-1G、SRM 610 和 SRM 612 进行数据质量监控。使用 Igor-pro(<http://www.wavemetrics.com>) 软件对电子探针分析获得的 Si 元素含量进行内标校准(Liu et al., 2008)。标样分析结果与参考值一致。样品分析误差小于 10%。外部标样 BCR-2G 和 BHVO-2G 的实测值和推荐值在误差范围内一致。

## 3 分析结果

样品的全岩主、微量元素分析结果见表 1 和表 2。由此可见, 样品的  $\text{MgO}$  含量(质量分数, 下同)较低(3.9%~6.0%),  $\text{TiO}_2$  含量较高(3%~4.5%), 均

表 1 滇东-黔西地区峨眉山玄武岩及标样主量元素分析结果

Table 1 Major element compositions of the Emeishan basalts from Diandong-Qianxi area and standards (%)

产地	样品号	MgO	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	总量	烧失量	
织金	GZ1901	4.45	3.93	49.60	13.00	15.07	0.18	2.64	1.57	8.12	0.43	98.98	0.83	
	GZ1902	3.99	4.07	49.66	13.04	14.53	0.16	2.54	1.14	8.45	0.47	98.05	1.17	
	GZ1904	4.22	4.06	48.93	13.18	14.66	0.19	2.13	0.89	9.25	0.46	97.97	1.28	
	GZ1905	4.16	4.13	48.92	13.09	14.79	0.19	2.42	0.97	8.81	0.47	97.95	1.59	
	GZ1906	4.68	4.24	48.14	13.33	14.82	0.19	2.09	1.24	9.06	0.42	98.21	1.14	
	GZ1907	4.53	4.05	48.43	12.85	15.02	0.19	2.34	1.73	8.33	0.44	97.90	1.26	
	GZ1908	4.57	4.01	48.87	12.80	15.49	0.19	1.86	1.95	8.11	0.43	98.29	0.93	
	GZ1909	4.39	4.04	49.45	12.88	15.13	0.19	2.00	1.97	8.11	0.44	98.61	0.70	
	GZ1910	4.48	4.03	48.85	12.80	15.35	0.22	1.91	1.84	8.30	0.44	98.21	1.02	
	GZ1911	4.60	4.14	47.83	13.31	15.34	0.22	2.06	1.38	8.61	0.47	97.96	1.47	
	GZ1913	4.78	4.20	48.65	13.23	14.65	0.19	2.09	1.84	8.37	0.41	98.41	0.71	
	GZ1914	4.80	4.24	48.54	13.34	14.95	0.19	2.14	1.82	8.40	0.42	98.84	0.61	
	GZ1915	4.86	4.22	48.44	13.25	14.92	0.19	2.10	1.85	8.40	0.41	98.65	0.75	
	GZ1916	4.54	4.07	48.77	12.86	15.69	0.20	2.60	1.24	8.46	0.44	98.86	0.84	
	GZ1917	4.58	4.05	48.79	12.86	15.37	0.19	2.59	1.22	8.26	0.43	98.34	0.71	
	GZ1918	4.64	4.05	49.14	12.85	15.95	0.20	2.40	1.47	8.31	0.43	99.44	0.59	
	GZ1919	4.59	4.06	49.29	12.81	15.20	0.18	2.49	1.37	8.24	0.43	98.66	0.57	
	GZ1920-1	4.54	4.09	48.72	13.01	15.10	0.19	2.22	1.18	8.86	0.44	98.35	0.75	
	GZ1920-2	4.38	4.07	49.18	12.91	15.34	0.19	2.35	1.40	8.29	0.44	98.55	0.62	
	GZ1921	4.68	4.14	48.38	13.31	14.76	0.19	1.85	1.54	9.19	0.43	98.47	0.78	
	GZ1923	4.32	4.12	48.36	13.10	15.54	0.22	2.13	1.02	9.20	0.44	98.44	0.87	
	GZ1924	4.46	4.14	48.55	13.32	14.71	0.18	2.09	1.12	9.29	0.43	98.29	0.84	
	GZ1925	4.97	4.13	45.39	13.17	15.59	0.20	1.96	0.96	10.10	0.42	96.88	2.43	
	GZ1926	4.31	4.44	48.28	13.74	15.03	0.17	2.45	1.13	8.29	0.45	98.29	0.85	
	GZ1927	4.30	4.15	48.31	13.29	15.12	0.29	2.12	1.36	8.94	0.44	98.31	0.92	
	GZ1928	4.69	4.19	48.99	13.34	14.53	0.18	2.27	1.44	8.56	0.42	98.61	0.46	
	GZ1929	4.41	4.19	49.02	13.27	14.46	0.18	2.41	0.87	8.95	0.42	98.18	0.84	
	盘州	GP1901	4.50	3.85	48.57	13.30	14.28	0.15	2.04	1.24	9.79	0.44	98.16	1.12
		GP1902	4.65	3.88	49.68	12.84	15.29	0.19	1.92	0.86	8.99	0.38	98.69	1.04
GP1903		4.28	3.82	49.95	13.03	15.21	0.19	2.12	1.19	8.65	0.42	98.87	0.60	
GP1904		4.48	3.92	49.89	12.81	15.36	0.18	2.32	1.21	8.50	0.38	99.05	0.37	
GP1906		4.66	4.25	49.52	13.35	15.02	0.22	2.06	1.35	8.62	0.43	99.48	0.81	
GP1907		4.31	4.18	50.36	13.08	14.62	0.23	1.95	1.55	8.87	0.42	99.56	0.55	
GP1908		4.79	4.19	48.51	13.32	14.39	0.19	2.03	1.29	9.21	0.42	98.33	0.73	
GP1909		4.37	4.09	49.17	12.97	15.42	0.22	2.47	1.46	7.79	0.46	98.42	1.70	
GP1910		5.19	4.45	44.80	13.94	15.88	0.25	2.35	1.88	8.22	0.43	97.39	2.48	
GP1911		4.19	4.08	48.87	13.05	16.23	0.23	2.15	1.07	9.40	0.44	99.71	1.03	
GP1912		4.22	3.81	51.45	13.05	15.05	0.20	2.30	1.36	8.36	0.44	100.23	0.44	
GP1913		4.50	3.85	49.86	13.08	15.26	0.19	2.35	1.21	8.56	0.43	99.29	1.07	
GP1914		4.11	3.82	51.44	13.02	14.70	0.20	2.13	1.71	8.25	0.43	99.8	0.63	
GP1915		4.72	3.89	49.07	12.82	15.48	0.19	1.90	1.33	8.52	0.38	98.29	0.95	
GP1916		4.69	3.78	47.26	13.07	16.50	0.21	2.68	0.90	9.00	0.44	98.53	0.74	
GP1917		4.47	3.90	49.86	12.87	15.30	0.22	1.99	1.28	8.68	0.37	98.95	0.66	
GP1918		4.44	3.82	49.14	13.05	15.10	0.18	1.99	1.32	8.75	0.42	98.22	0.98	
GP1919		5.23	3.24	47.58	13.14	15.66	0.26	2.58	0.47	9.51	0.45	98.11	1.37	
GP1920		5.33	2.98	47.82	13.30	15.61	0.22	2.36	0.57	9.97	0.37	98.52	0.96	
GP1921		5.39	3.23	45.77	13.54	16.20	0.24	2.66	0.37	10.28	0.48	98.16	1.47	
GP1922		5.25	3.16	45.75	13.10	17.36	0.25	2.38	0.45	10.72	0.44	98.86	0.98	

续表1

产地	样品号	MgO	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	总量	烧失量
盘州	GP1923	4.84	3.87	46.20	13.34	17.37	0.23	2.49	0.91	8.91	0.44	98.61	1.30
	GP1924	5.11	3.23	47.37	13.40	16.34	0.25	2.48	0.58	10.01	0.46	99.22	0.85
	GP1925	4.95	3.79	47.11	13.04	16.40	0.20	2.54	0.81	8.91	0.44	98.19	1.02
	GP1926	5.08	3.15	47.17	13.22	15.53	0.22	2.43	0.59	10.41	0.44	98.25	0.79
	GP1927	4.57	3.93	49.38	12.85	15.54	0.19	2.15	1.06	8.86	0.38	98.91	0.59
	GP1928	4.81	3.79	47.39	13.11	16.61	0.22	2.62	0.84	9.06	0.44	98.89	0.92
	GP1929	4.61	3.81	47.35	13.02	16.34	0.21	2.63	0.97	8.90	0.44	98.28	1.07
	GP1930-1	4.58	3.80	47.38	13.06	16.53	0.22	2.56	0.89	9.05	0.44	98.50	1.13
	GP1930-2	4.55	4.09	49.55	13.28	14.07	0.17	2.29	0.87	9.05	0.44	98.36	1.35
	GP1932	4.45	3.89	49.20	13.24	14.98	0.20	2.02	0.75	8.93	0.53	98.19	1.45
威宁	GW1901	5.41	2.51	48.49	13.54	15.01	0.21	2.49	0.54	10.28	0.33	98.81	0.78
	GW1902	5.88	3.01	46.04	14.02	15.39	0.22	2.52	0.92	9.76	0.54	98.29	0.99
	GW1903	5.58	3.12	45.65	14.57	15.41	0.22	2.96	0.78	9.11	0.53	97.93	1.26
	GW1904	4.55	3.85	48.91	12.99	15.14	0.20	1.93	1.25	9.00	0.38	98.21	1.32
	GW1907	4.20	4.38	49.08	12.75	15.22	0.17	2.05	1.27	8.37	0.50	98.00	1.53
	GW1908	4.00	4.32	49.99	12.51	15.22	0.21	2.16	1.12	8.41	0.50	98.44	1.22
	GW1909	3.92	4.29	50.88	12.36	15.58	0.25	2.20	0.91	8.02	0.49	98.89	0.99
	GW1910	4.02	4.32	49.75	12.50	15.29	0.19	2.11	1.40	8.24	0.49	98.31	0.91
	GW1912	3.83	4.38	49.84	12.40	14.96	0.21	2.09	0.54	9.18	0.50	97.93	1.69
	GW1913	4.18	4.30	49.76	12.43	15.41	0.21	2.10	1.18	8.25	0.49	98.31	1.11
	GW1915	4.34	3.86	50.21	12.93	14.45	0.17	2.32	1.34	8.38	0.38	98.39	0.83
	GW1918	4.41	3.88	49.15	12.85	14.76	0.18	1.95	1.37	8.91	0.38	97.84	1.29
	GW1919	3.86	4.31	50.14	12.47	14.81	0.19	2.32	1.27	8.35	0.50	98.21	0.93
	GW1921	4.86	3.37	46.30	13.69	15.96	0.23	2.81	0.61	9.84	0.45	98.13	1.53
	GW1922	4.83	3.39	47.48	13.26	16.59	0.26	2.55	0.52	9.23	0.46	98.57	1.27
	GW1923	4.48	3.93	49.46	12.81	15.31	0.18	2.60	0.67	8.56	0.38	98.38	1.00
	GW1924	4.57	3.91	49.39	12.77	14.92	0.18	2.40	0.62	8.66	0.38	97.80	1.30
	GW1925	4.29	3.87	49.97	13.04	14.43	0.18	2.75	0.82	8.44	0.43	98.21	0.97
	GW1926	4.79	3.70	47.51	13.06	16.07	0.20	2.71	0.88	9.06	0.44	98.42	0.75
	GW1927	4.09	3.71	47.49	13.13	16.59	0.23	2.95	1.31	8.91	0.44	98.84	0.72
	GW1928	4.68	3.81	46.71	13.41	16.15	0.20	2.66	0.85	9.27	0.45	98.18	1.32
	GW1929	5.85	3.11	45.28	14.02	14.95	0.24	2.49	0.91	9.82	0.55	97.22	2.09
	GW1930	4.55	3.87	49.20	12.81	15.20	0.21	1.99	0.87	8.91	0.38	97.98	1.47
	GW1932	4.19	4.39	47.87	12.70	15.75	0.20	2.25	1.10	8.72	0.50	97.67	1.80
	GW1933	4.26	4.35	48.19	12.59	15.60	0.18	1.89	1.77	8.72	0.50	98.05	1.16
	GW1934	4.62	4.09	48.92	13.00	14.96	0.19	2.60	0.66	8.48	0.47	97.98	1.56
	GW1936	4.53	4.09	48.71	13.11	14.82	0.21	1.88	0.96	9.16	0.47	97.94	1.22
	GW1937	4.43	4.12	49.32	13.19	14.57	0.20	2.18	0.96	8.94	0.47	98.38	0.76
	GW1938	4.50	4.11	48.93	13.08	14.71	0.19	2.10	0.83	9.00	0.47	97.92	1.19
	GW1939	4.56	4.12	48.88	13.12	15.29	0.19	2.04	0.90	8.94	0.46	98.50	1.13
GW1940	4.14	4.36	48.02	12.61	15.44	0.18	2.36	1.52	8.89	0.50	98.01	1.09	
东川	DQ-6	4.92	4.24	48.69	11.83	16.86	0.23	2.17	0.88	8.68	0.46	98.96	1.27
	DQ-8	5.19	4.32	46.73	12.71	16.50	0.21	2.00	0.75	9.75	0.45	98.60	1.42
	DQ-11	5.33	3.93	49.29	12.73	14.71	0.19	2.31	1.16	9.04	0.46	99.13	1.02
	DQ-13	5.33	3.91	49.82	12.79	14.45	0.18	2.52	1.79	8.36	0.47	99.62	0.59
	DQ-19	4.86	4.28	47.15	12.30	16.33	0.20	1.66	0.90	9.93	0.48	98.09	1.80
实测值	W-2a	6.43	1.04	52.24	15.02	10.83	0.16	2.21	0.62	10.66	0.12		
推荐值		6.43	1.06	52.57	15.38	10.80	0.17	2.20	0.62	10.91	0.14		

注: W-2a 为辉绿岩国际标样, 推荐值引自 GeoREM (<http://georem.mpch-mainz.gwdg.de>)。 (C) 1994-2021 China Academic Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>



续表 2

样号	织金										盘州																																		
	GZ1	GZ2	GZ3	GZ4	GZ5	GZ6	GZ7	GZ8	GZ9	GZ10	GPI	GPI1	GPI2	GPI3	GPI4	GPI5	GPI6	GPI7	GPI8	GPI9	GPI10	GPI11	GPI12	GPI13	GPI14	GPI15	GPI16	GPI17	GPI18	GPI19	GPI20	GPI21	GPI22												
Sc	22.80	23.40	22.50	22.40	25.00	21.70	24.10	22.30	24.10	23.50	24.10	23.50	24.40	22.60	23.40	24.20	21.90	24.30	22.70	24.40	27.50	26.40	27.70	398	395	388	401	400	429	410	394	419	426	381	383	385	425	408	424	403	381	407	410	425	
V	422	422	432	401	400	429	410	394	419	426	381	383	385	425	408	424	403	381	407	410	425	45.90	68.80	50.80	71.40	44.50	53.30	42.90	37.30	46.00	62.40	47.90	49.20	51.30	78.20	42.50	70.90	52.20	57.70	51.90	62.70	65.20			
Cr	43.70	44.80	41.80	71.40	59.00	53.90	56.10	43.70	50.20	54.40	52.40	55.60	52.20	56.30	61.30	56.20	70.50	47.90	58.10	55.30	59.70	46.90	54.70	55.30	57.40	59.00	53.90	56.10	43.70	50.20	54.40	52.40	55.60	52.20	56.30	61.30	56.20	70.50	47.90	58.10	55.30	59.70			
Co	51.20	48.50	58.10	52.90	62.60	51.10	64.60	59.20	65.00	68.80	51.50	63.70	61.50	55.40	53.70	52.70	71.50	58.40	64.50	53.90	60.90	64.90	52.90	62.60	51.10	64.60	59.20	65.00	68.80	51.50	63.70	61.50	55.40	53.70	52.70	71.50	58.40	64.50	53.90	60.90	64.90				
Ni	64.00	64.50	66.80	196	200	188	203	199	227	203	208	299	222	208	197	199	206	265	194	205	208	230	241	217	196	200	188	203	199	227	203	208	299	222	208	197	199	206	265	194	205	208	230	241	217
Cu	206	204	204	142	130	143	149	153	165	156	159	165	173	165	154	149	157	148	149	144	133	144	140	142	130	143	149	153	165	156	159	165	173	165	154	149	157	148	149	144	133	144	140	140	
Zn	148	162	152	24.90	23.50	22.60	25.10	23.20	22.80	23.50	24.60	24.50	240.00	23.70	23.30	23.50	24.90	23.30	24.60	24.50	19.40	21.60	21.60	24.90	23.50	22.60	25.10	23.20	22.80	23.50	24.60	24.50	240.00	23.70	23.30	23.50	24.90	23.30	24.60	24.50	19.40	21.60	21.60		
Ga	23.80	23.50	23.40	34.40	32.70	36.50	40.10	29.90	50.20	30.00	53.90	60.40	20.90	23.10	35.90	45.90	52.00	16.20	41.40	46.30	8.78	13.00	6.25	34.40	32.70	36.50	40.10	29.90	50.20	30.00	53.90	60.40	20.90	23.10	35.90	45.90	52.00	16.20	41.40	46.30	8.78	13.00	5.79	6.25	
Rb	40.30	28.40	17.80	542	504	533	618	701	663	779	634	544	582	823	550	477	740	483	519	508	806	539	532	542	504	533	618	701	663	779	634	544	582	823	550	477	740	483	519	508	806	539	532		
Sr	741	768	725	352	332	339	347	332	367	338	398	364	355	360	346	347	340	290	311	331	193	208	201	352	332	339	347	332	367	338	398	364	355	360	346	347	340	290	311	331	193	208	201	201	
Zr	350	354	343	38.50	35.90	38.00	35.80	39.70	41.40	40.50	45.30	42.10	40.10	39.10	38.20	37.60	36.30	37.30	34.10	37.50	26.00	29.90	28.40	28.10	38.50	35.90	38.00	35.80	39.70	41.40	40.50	45.30	42.10	40.10	39.10	38.20	37.60	36.30	37.30	34.10	37.50	26.00	29.90	28.40	28.10
Nb	42.70	45.10	41.80	379	355	427	388	519	605	570	572	637	464	456	450	464	350	482	363	362	833	411	682	900	379	355	427	388	519	605	570	572	637	464	456	450	464	350	482	363	362	833	411	682	900
Ba	496	1223	535	47.80	45.00	44.60	42.20	44.70	47.30	45.50	49.30	48.00	44.80	44.30	45.10	45.20	45.20	46.00	42.20	46.20	33.50	36.20	34.50	47.80	45.00	44.60	42.20	44.70	47.30	45.50	49.30	48.00	44.80	44.30	45.10	45.20	45.20	46.00	42.20	46.20	33.50	36.20	35.80	34.50	
La	46.90	48.10	48.10	107.00	95.90	98.10	94.40	109.00	113.00	108.00	122.00	112.00	107.00	103.00	107.00	104.00	98.20	96.90	91.80	101.00	71.30	79.20	76.10	107.00	95.90	98.10	94.40	109.00	113.00	108.00	122.00	112.00	107.00	103.00	107.00	104.00	98.20	96.90	91.80	101.00	71.30	79.20	76.10	76.10	
Ce	108.00	111.00	111.00	13.50	12.10	11.90	11.80	13.20	13.90	13.10	14.40	13.80	13.10	13.10	12.70	12.70	12.30	11.60	11.80	12.90	8.57	9.39	9.70	9.48	13.50	12.10	11.90	11.80	13.20	13.90	13.10	14.40	13.80	13.10	13.10	12.70	12.30	11.60	11.80	12.90	8.57	9.39	9.70	9.48	
Pr	13.50	13.70	13.60	58.70	53.90	55.50	55.70	57.70	58.80	57.20	65.50	62.30	58.40	59.20	56.10	57.80	55.20	49.10	51.90	55.50	38.60	40.40	41.60	58.70	53.90	55.50	55.70	57.70	58.80	57.20	65.50	62.30	58.40	59.20	56.10	57.80	55.20	49.10	51.90	55.50	38.60	40.40	41.80	41.60	
Nd	60.00	61.00	61.20	12.40	11.60	11.70	11.50	11.90	12.20	11.80	13.80	120.00	12.10	12.50	11.80	11.70	11.70	10.60	11.20	12.00	8.35	8.55	9.11	9.25	12.40	11.60	11.70	11.50	11.90	12.20	11.80	13.80	120.00	12.10	12.50	11.80	11.70	11.70	10.60	11.20	12.00	8.35	8.55	9.11	9.25
Sm	12.60	12.70	12.40	3.62	3.40	3.37	3.45	3.72	3.70	3.60	3.92	3.64	3.76	3.70	3.52	3.54	3.55	3.21	3.51	3.48	2.87	2.63	3.10	3.62	3.40	3.37	3.45	3.72	3.70	3.60	3.92	3.64	3.76	3.70	3.52	3.54	3.55	3.21	3.51	3.48	2.87	2.63	3.13	3.10	
Eu	3.56	3.68	3.69	11.20	10.90	10.60	11.40	10.80	10.70	10.60	12.50	11.00	11.60	11.30	10.60	11.00	11.20	9.89	10.70	11.20	8.17	8.40	8.99	11.20	10.90	10.60	11.40	10.80	10.70	10.60	12.50	11.00	11.60	11.30	10.60	11.00	11.20	9.89	10.70	11.20	8.17	8.40	8.99	8.99	
Gd	11.00	11.10	11.00	1.58	1.53	1.46	1.50	1.42	1.52	1.37	1.66	1.48	1.57	1.55	1.51	1.48	1.62	1.37	1.49	1.54	1.14	1.25	1.22	1.58	1.53	1.46	1.50	1.42	1.52	1.37	1.66	1.48	1.57	1.55	1.51	1.48	1.62	1.37	1.49	1.54	1.14	1.25	1.22		
Tb	1.47	1.53	1.51	8.93	8.54	8.42	8.81	7.70	7.96	7.78	9.60	8.08	8.77	8.50	8.41	8.34	8.97	7.68	8.54	8.66	6.37	6.84	7.08	8.93	8.54	8.42	8.81	7.70	7.96	7.78	9.60	8.08	8.77	8.50	8.41	8.34	8.97	7.68	8.54	8.66	6.37	6.84	7.14	7.08	
Dy	8.16	8.08	8.39	1.57	1.50	1.47	1.56	1.44	1.42	1.36	1.75	1.47	1.59	1.57	1.50	1.52	1.64	1.44	1.58	1.59	1.23	1.34	1.32	1.57	1.50	1.47	1.56	1.44	1.42	1.36	1.75	1.47	1.59	1.57	1.50	1.52	1.64	1.44	1.58	1.59	1.23	1.34	1.37	1.32	
Ho	1.42	1.49	1.45	4.08	3.99	3.85	3.86	3.60	3.66	3.50	4.38	3.67	4.13	4.03	3.86	3.90	4.29	3.66	4.05	4.00	3.13	3.36	3.45	4.08	3.99	3.85	3.86	3.60	3.66	3.50	4.38	3.67	4.13	4.03	3.86	3.90	4.29	3.66	4.05	4.00	3.13	3.36	3.52	3.45	
Er	3.68	3.80	3.73	0.54	0.52	0.50	0.53	0.47	0.47	0.46	0.59	0.50	0.52	0.54	0.51	0.51	0.55	0.49	0.53	0.54	0.43	0.48	0.46	0.54	0.52	0.50	0.53	0.47	0.47	0.46	0.59	0.50	0.52	0.54	0.51	0.51	0.55	0.49	0.53	0.54	0.43	0.48	0.48	0.46	
Tm	0.48	0.50	0.48	3.40	3.18	3.06	3.05	2.78	2.81	2.70	3.48	2.94	3.12	3.09	3.13	3.06	3.32	3.02	3.24	3.19	2.58	2.91	2.83	3.40	3.18	3.06	3.05	2.78	2.81	2.70	3.48	2.94	3.12	3.09	3.13	3.06	3.32	3.02	3.24	3.19	2.58	2.89	2.91	2.83	
Yb	2.84	2.99	2.94	0.49	0.46	0.44	0.44	0.39	0.40	0.38	0.49	0.40	0.45	0.45	0.43	0.44	0.48	0.42	0.45	0.46	0.38	0.42	0.41	0.49	0.46	0.44	0.44	0.39	0.40	0.38	0.49	0.40	0.45	0.45	0.43	0.44	0.48	0.42	0.45	0.46	0.38	0.42	0.41	0.41	
Lu	0.40	0.43	0.41	40.40	41.60	40.00	41.80	36.30	36.80	36.30	44.60	37.50	44.30	42.00	38.70	39.30	42.10	37.00	39.70	39.60	34.10	34.30	33.10	40.40	41.60	40.00	41.80	36.30	36.80	36.30	44.60	37.50	44.30	42.00	38.70	39.30	42.10	37.00	39.70	39.60	34.10	34.30	33.10	33.10	
Y	38.30	39.60	37.60	9.39	8.77	8.54	8.85	8.94	8.99	8.84	10.80	9.46	9.22	9.24	8.83	8.86	8.87	7.60	8.54	8.70	5.09	5.68	5.47	9.39	8.77	8.54	8.85	8.94	8.99	8.84	10.80	9.46	9.22	9.24	8.83	8.86	8.87	7.60	8.54	8.70	5.09	5.68	5.68	5.47	
Hf	9.14	9.38	9.06	2.66	2.33	2.41	2.32	2.83	2.86	2.73	3.08	2.87	2.68	2.55	2.61																														



续表 2

样号	盘州												威宁												
	GPI	GPI	GPI	GPI	GPI	GPI	GPI	GPI	GPI	GPI	GPI	GPI	GWI	GWI	GWI	GWI	GWI	GWI	GWI	GWI	GWI	GWI			
923	27.90	21.00	26.10	23.60	23.20	21.60	21.60	21.70	20.40	19.90	932	30.50	22.70	23.90	23.20	20.80	21.90	23.70	24.10	23.40	23.60	25.00	26.10	24.30	27.60
409	422	379	378	384	401	381	400	370	336	336	930-1	385	334	374	415	384	396	400	410	397	403	414	418	403	391
Cr	43.60	63.40	44.80	61.60	68.60	45.70	40.80	39.90	39.60	13.20	930-2	62.40	75.70	79.40	73.10	39.30	41.80	41.00	38.70	38.50	38.20	72.50	72.70	46.50	49.60
Co	55.80	60.00	51.90	53.00	51.20	61.00	57.70	61.20	47.00	48.10		60.80	58.90	60.10	49.50	60.60	53.20	54.20	51.20	47.30	49.90	59.10	59.90	61.50	61.90
Ni	57.80	60.60	54.30	58.10	66.40	58.60	54.20	57.00	53.60	33.70		59.40	68.60	71.60	55.40	53.70	52.60	53.10	53.50	52.00	53.50	53.80	64.80	52.40	57.60
Cu	265	215	246	189	185	251	233	247	169	124		200	90.8	104	216	195	195	199	212	366	203	207	187	204	232
Zn	153	137	147	124	168	178	152	159	140	151		144	127	128	162	162	148	164	160	161	170	152	147	153	146
Ga	23.70	21.90	22.80	21.40	24.70	23.20	22.50	22.90	23.40	25.40		20.90	19.20	22.60	25.60	25.20	25.80	24.70	25.50	24.10	25.20	24.90	23.50	24.80	21.90
Rb	12.00	7.89	14.60	7.77	44.20	14.80	18.10	15.00	23.80	17.90		14.20	18.70	12.50	59.30	36.90	32.60	21.80	43.50	11.00	42.30	68.60	51.80	44.80	15.80
Sr	549	565	716	470	531	788	735	781	568	732		481	492	619	508	533	565	620	572	579	582	644	510	605	562
Zr	297	205	276	192	322	296	285	295	312	364		198	140	208	344	360	382	392	398	389	389	338	325	392	238
Nb	38.20	28.70	35.60	25.90	35.60	36.40	36.40	37.40	39.00	43.90		26.20	22.60	30.90	34.10	43.70	44.40	44.30	45.50	44.90	44.60	34.20	34.60	44.40	30.20
Ba	463	812	543	723	382	544	559	649	391	505		381	549	878	480	420	553	603	526	487	550	418	612	547	401
La	45.90	35.80	45.00	34.60	45.40	47.30	45.50	46.90	47.30	55.40		32.60	30.80	37.50	45.20	52.00	56.00	55.10	56.40	56.00	54.80	45.30	43.10	55.20	35.90
Ce	97.00	77.40	92.60	70.70	96.50	96.00	90.90	93.70	99.70	116		65.20	65.40	81.00	102.00	115.00	120.00	123.00	125.00	124.00	121.00	101.00	96.30	122.00	77.90
Pr	11.80	9.73	11.90	9.67	12.80	12.40	12.10	12.00	13.10	15.80		8.52	8.84	10.40	13.00	14.80	15.60	15.30	15.60	15.30	15.10	12.70	12.30	15.10	9.53
Nd	50.70	41.70	50.90	41.00	53.50	50.90	49.60	51.10	55.40	66.60		35.60	37.20	45.00	58.30	65.80	66.70	66.70	68.30	65.90	64.80	56.10	54.30	65.30	40.60
Sm	10.90	9.28	10.60	8.91	12.00	10.90	10.50	10.60	11.70	13.60		7.80	7.90	9.12	12.10	13.40	13.70	14.00	14.30	13.80	13.40	12.20	11.70	13.40	8.53
Eu	3.26	3.15	3.22	3.15	3.66	3.39	3.28	3.53	3.61	4.26		2.57	3.09	3.20	3.60	3.89	4.00	4.02	4.13	4.01	4.02	3.57	3.52	4.04	2.69
Gd	9.77	8.94	10.20	8.43	11.60	10.50	9.99	9.78	10.60	12.40		8.01	7.62	7.94	10.70	11.50	11.80	12.00	12.20	11.80	11.90	10.80	10.70	12.00	8.16
Tb	1.41	1.28	1.37	1.18	1.61	1.41	1.37	1.36	1.40	1.58		1.13	1.01	1.19	1.59	1.74	1.74	1.69	1.71	1.66	1.68	1.53	1.69	1.19	1.19
Dy	7.99	7.14	7.61	6.63	8.71	7.8	7.34	7.65	7.50	8.60		6.57	5.55	6.89	9.09	9.33	9.98	9.30	9.56	9.11	9.21	8.50	8.80	9.28	6.84
Ho	1.50	1.39	1.43	1.24	1.59	1.43	1.35	1.41	1.37	1.55		1.30	1.05	1.26	1.63	1.68	1.77	1.68	1.73	1.64	1.68	1.55	1.60	1.66	1.3
Er	3.82	3.53	3.62	3.28	4.10	3.69	3.51	3.61	3.47	3.85		3.49	2.67	3.34	4.14	4.42	4.59	4.31	4.39	4.19	4.28	3.93	4.12	4.25	3.42
Tm	0.52	0.48	0.49	0.45	0.56	0.51	0.48	0.50	0.45	0.50		0.49	0.37	0.46	0.55	0.57	0.6	0.56	0.58	0.54	0.55	0.52	0.54	0.55	0.46
Yb	3.08	2.87	2.99	2.70	3.29	3.07	2.92	3.08	2.72	2.98		3.01	2.24	2.72	3.19	3.36	3.53	3.39	3.47	3.25	3.27	3.06	3.24	3.29	2.78
Lu	0.43	0.42	0.42	0.38	0.45	0.43	0.40	0.41	0.37	0.42		0.43	0.32	0.41	0.45	0.48	0.50	0.48	0.48	0.45	0.46	0.43	0.45	0.46	0.40
Y	35.80	33.70	36.60	31.30	41.40	36.80	36.50	36.80	36.60	39.00		32.80	26.50	31.50	41.50	43.60	43.60	43.40	44.30	43.30	43.10	40.00	41.50	43.00	34.10
Hf	7.75	5.60	7.76	5.11	8.81	7.75	7.52	7.59	8.22	9.37		5.26	3.91	5.51	9.15	10.10	10.30	10.00	10.20	9.71	9.92	8.96	8.61	9.89	5.98
Ta	2.35	1.80	2.32	1.63	2.23	2.41	2.26	2.36	2.46	2.68		1.61	1.38	2.01	2.25	2.83	2.97	3.07	3.14	2.98	3.02	2.37	2.38	3.07	1.98
Pb	5.87	4.80	5.12	4.05	7.11	5.36	5.77	5.76	5.82	6.03		3.97	2.93	3.79	6.06	6.38	6.87	7.08	7.85	7.04	6.80	6.37	6.85	8.04	5.76
Th	5.36	3.85	6.49	3.89	6.89	6.32	5.80	5.99	6.40	7.32		4.07	2.99	4.75	6.79	7.51	7.92	8.56	8.67	8.25	8.24	7.55	6.85	8.22	4.89
U	1.34	0.91	1.55	0.97	1.63	1.54	1.44	1.48	1.64	1.89		1.01	0.79	1.27	1.79	1.91	2.05	2.01	2.02	1.91	1.94	1.76	1.56	1.92	1.13

续表 2

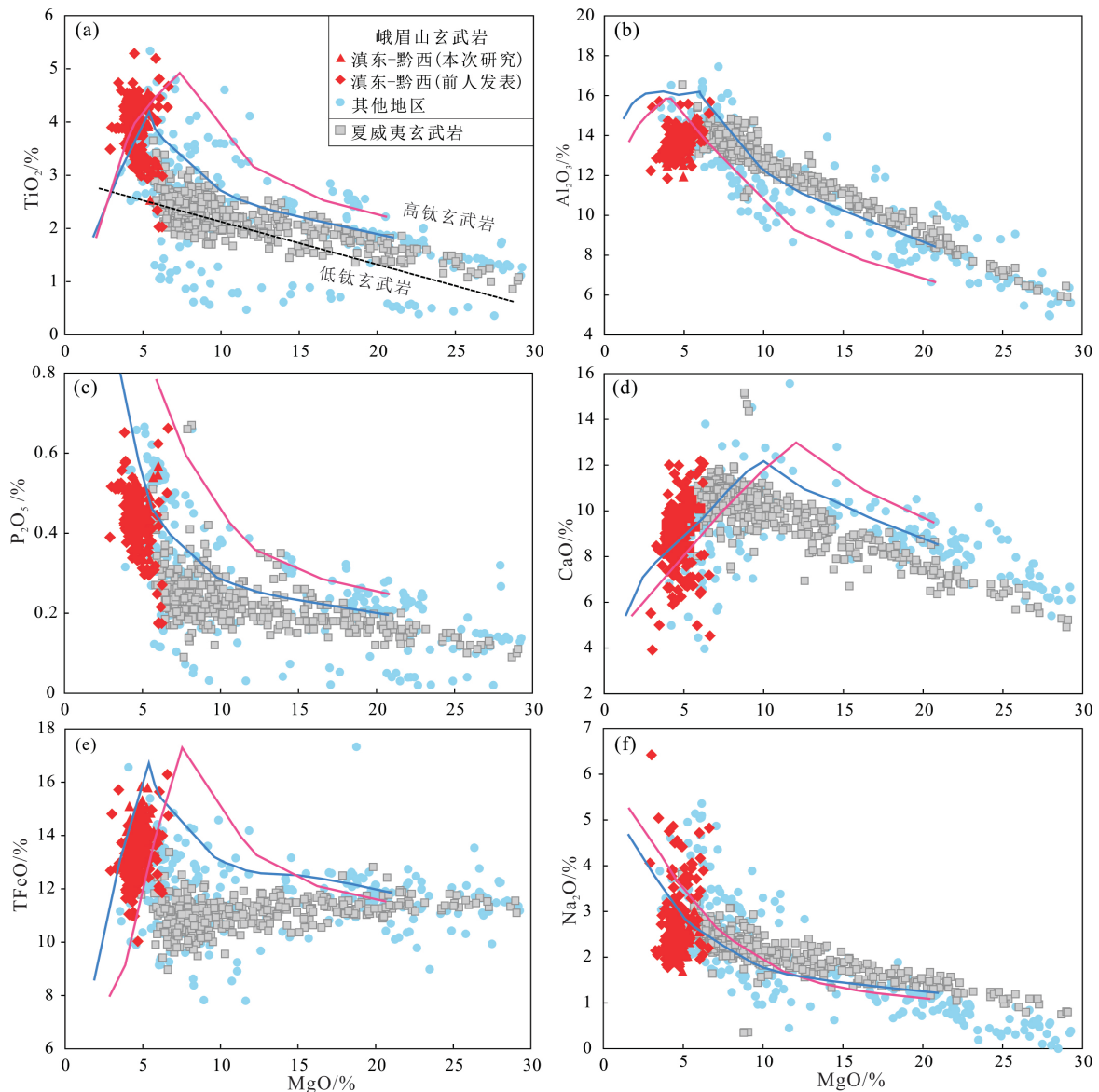
样号	产地																			东川					实测值	推荐值	
	威宁																			DQ-6	DQ-8	DQ-11	DQ-13	DQ-19			W-2a
Sc	26.90	26.00	23.10	22.40	22.80	23.90	23.40	23.90	22.50	20.80	22.40	20.90	22.70	23.60	23.10	23.60	23.10	23.60	24.60	33.10	32.20	31.80	31.80	31.80	33.40	35.90	36.00
V	387	408	395	387	407	420	413	377	408	370	384	374	391	406	397	408	416	408	416	472	481	442	423	467	272	268	
Cr	56.90	71.10	74.80	51.80	44.10	46.70	44.60	77.80	72.60	36.50	40.00	30.20	29.40	30.90	31.20	32.50	37.60	32.50	37.60	52.70	45.90	91.80	92.10	41.70	88.50	93.00	
Co	56.70	71.70	55.50	60.30	55.90	54.80	53.30	53.10	49.80	49.30	48.30	71.10	570.00	57.70	52.50	53.40	49.50	53.40	49.50	47.80	50.70	44.50	43.40	47.40	45.20	45.00	
Ni	53.20	65.60	62.80	53.90	55.50	54.60	57.00	68.60	52.60	52.10	54.10	54.50	52.50	54.70	51.30	53.50	52.00	53.50	52.00	47.20	58.90	68.30	69.10	47.90	77.10	72.00	
Cu	328	196	184	190	251	240	260	101	208	178	206	192	181	187	184	187	209	187	209	216	241	253	268	181	100.48	105	
Zn	148	152	153	141	167	152	155	127	137	146	156	149	148	170	150	164	160	164	160	148	138	129	124	130	76.10	77.70	
Ga	22.70	24.80	23.60	25.40	23.60	24.30	24.00	21.20	25.70	24.00	27.30	25.20	24.20	24.50	24.40	25.00	26.10	25.00	26.10	29.00	30.70	29.20	30.00	29.20	17.70	17.88	
Rb	5.11	55.90	52.90	50.20	20.10	36.70	10.80	16.10	29.70	53.70	83.60	84.00	18.30	20.30	14.80	20.10	38.70	20.30	38.70	26.80	7.83	29.30	47.80	22.00	22.50	21.00	
Sr	488	582	767	560	612	457	522	482	504	580	581	825	657	711	635	649	513	649	513	788	544	756	454	458	238	196	
Zr	244	323	310	312	273	284	291	149	335	367	410	349	339	346	345	394	394	345	394	370	377	372	387	394	101	92	
Nb	32.70	34.50	31.80	35.20	35.60	34.60	37.00	21.70	35.80	45.10	47.50	43.50	40.60	41.80	41.00	41.50	45.40	41.00	45.40	36.60	33.70	39.30	40.20	41.50	8.00	7.50	
Ba	607	383	331	436	538	447	441	571	399	452	625	438	574	717	485	496	486	485	496	449	408	509	493	336	186	172	
La	41.60	42.20	43.20	45.80	45.00	46.10	45.90	33.00	45.40	52.20	56.60	51.00	50.80	53.30	50.60	51.20	57.70	50.60	51.20	46.20	48.10	47.00	49.30	47.90	11.20	10.80	
Ce	86.90	94.10	93.40	101.00	93.80	99.30	98.70	70.50	105	118	128	114	113	115	111	113	124	113	124	100	104	101	106	105	25	23.40	
Pr	10.70	11.90	12.70	12.80	12.20	12.30	12.30	9.57	13.00	14.80	15.80	14.30	13.90	14.20	13.90	14.00	15.20	13.90	14.00	13.40	13.90	13.30	14.10	13.90	2.80	3.00	
Nd	46.40	52.30	54.90	57.10	52.90	54.10	53.50	42.00	56.70	64.80	68.40	61.90	59.70	60.20	59.20	60.30	65.10	59.20	60.30	56.50	58.50	55.70	58.70	57.90	12.80	13.00	
Sm	9.70	11.30	11.90	12.50	11.10	11.50	11.20	8.65	12.30	13.40	14.10	12.60	12.40	12.50	12.30	12.40	13.60	12.30	12.40	11.80	12.10	11.40	12.00	12.20	3.31	3.30	
Eu	3.23	3.43	3.61	3.60	3.22	3.46	3.34	3.30	3.74	3.98	4.26	3.87	3.67	3.70	3.59	3.69	3.97	3.59	3.69	3.27	3.40	3.18	3.26	3.43	1.20	1.08	
Gd	9.43	10.50	10.60	10.50	9.50	9.68	9.82	7.75	10.80	12.10	12.80	10.80	10.30	10.50	10.30	10.50	11.70	10.30	10.50	11.10	11.10	10.50	11.00	11.30	3.81	3.66	
Tb	1.34	1.52	1.60	1.59	1.46	1.49	1.48	1.14	1.59	1.69	1.79	1.54	1.50	1.52	1.48	1.50	1.67	1.48	1.50	1.59	1.57	1.47	1.54	1.62	0.61	0.62	
Dy	7.62	8.56	9.35	9.16	8.48	8.73	8.72	6.64	8.70	9.22	9.61	8.24	8.09	8.10	7.90	8.06	9.15	7.90	8.06	8.39	8.18	7.62	7.95	8.67	3.61	3.79	
Hf	1.43	1.56	1.68	1.66	1.56	1.56	1.59	1.21	1.65	1.72	1.82	1.52	1.44	1.46	1.43	1.45	1.65	1.43	1.45	1.56	1.50	1.40	1.47	1.61	0.80	0.79	
Er	3.72	3.99	4.29	4.14	4.01	4.12	4.13	3.11	4.03	4.24	4.50	3.69	3.66	3.68	3.62	3.67	4.20	3.62	3.67	4.06	3.83	3.62	3.79	4.16	2.12	2.22	
Tm	0.49	0.53	0.59	0.58	0.54	0.56	0.56	0.42	0.55	0.57	0.60	0.50	0.47	0.47	0.46	0.48	0.55	0.46	0.48	0.57	0.53	0.50	0.53	0.58	0.31	0.33	
Yb	2.94	3.12	3.34	3.32	3.25	3.30	3.31	2.54	3.22	3.40	3.51	2.96	2.84	2.87	2.82	2.84	3.34	2.82	2.84	3.31	3.04	2.9	3.03	3.40	2.05	2.05	
Lu	0.42	0.44	0.47	0.46	0.46	0.47	0.47	0.37	0.46	0.49	0.51	0.42	0.40	0.40	0.39	0.40	0.47	0.39	0.40	0.48	0.43	0.42	0.44	0.49	0.28	0.31	
Y	37.20	41.10	39.00	39.20	37.00	36.20	37.30	27.20	39.10	39.50	43.80	37.70	38.10	38.20	37.00	37.50	43.70	37.00	37.50	41.60	40.70	37.80	38.70	43.10	22.10	22.00	
Hf	6.18	8.38	8.83	9.06	7.99	8.13	8.12	4.16	9.29	10.20	10.90	9.06	8.71	8.88	8.66	8.80	9.86	8.66	8.80	9.11	9.24	8.95	9.44	9.46	2.42	2.45	
Ta	2.13	2.36	2.30	2.49	2.40	2.52	2.44	1.54	2.32	2.95	3.10	2.89	2.82	2.86	2.80	2.83	3.06	2.80	2.83	1.87	1.33	2.48	2.60	2.45	0.47	0.47	
Pb	11.00	5.69	5.80	6.21	5.23	5.25	5.32	2.72	5.91	5.77	7.85	6.89	5.26	6.48	5.06	6.68	8.11	5.06	6.68	5.49	5.25	5.77	5.35	6.05	7.12	7.70	
Th	4.95	6.61	6.94	7.21	5.33	5.77	5.34	2.94	7.42	8.32	8.13	7.12	7.09	7.28	7.18	7.26	8.20	7.18	7.26	6.51	6.11	6.14	6.54	6.82	1.92	2.17	
U	1.07	1.50	1.74	1.84	1.35	1.50	1.36	0.85	1.87	2.16	2.19	1.84	1.84	1.81	1.72	1.74	1.98	1.72	1.74	1.45	1.41	1.43	1.48	1.54	0.48	0.51	

注: W-2a 为辉绿岩国际标样, 推荐值引自 GeoReM (<http://geonem.mpech-mainz.gwdg.de>)。

为高钛玄武岩,TFeO(全铁)含量较高(14.3%~17.6%)。SiO<sub>2</sub>含量为46%~52%,Na<sub>2</sub>O为1.7%~3.0%,K<sub>2</sub>O为0.4%~2.0%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为12%~15%,CaO为7.9%~10.8%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>为0.3%~0.6%。REE总量(200×10<sup>-6</sup>~366×10<sup>-6</sup>)和Nb-Ga-Zr含量(Nb为19×10<sup>-6</sup>~30×10<sup>-6</sup>,Ga为21×10<sup>-6</sup>~48×10<sup>-6</sup>,Zr为140×10<sup>-6</sup>~410×10<sup>-6</sup>)均较高。轻稀土(LREE)较重稀土(HREE)更加富集(La/Yb为11~19),Ti/Y值为532~737。与夏威夷玄武岩和其他地区峨眉山高钛/低钛玄武岩相比,滇东-黔西地区峨眉山玄武岩

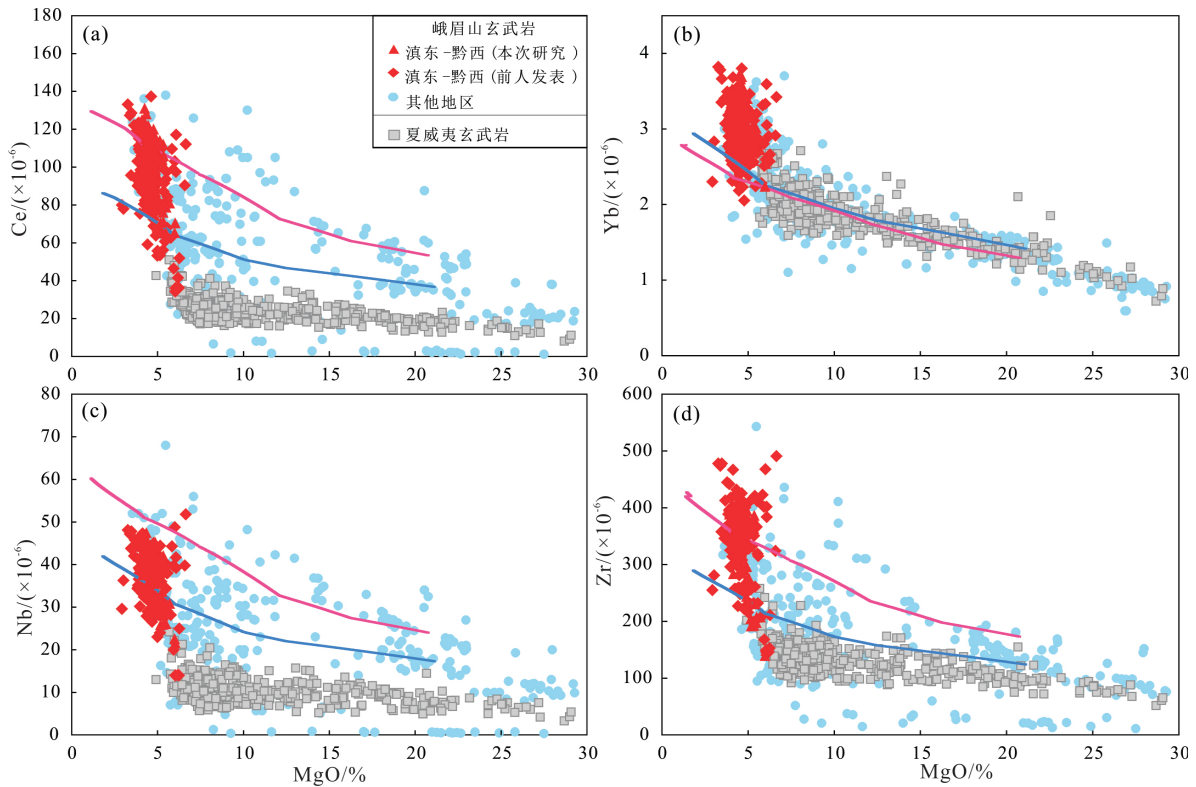
成分变化不大,MgO更低,TiO<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量更高(图2、3)。另外,峨眉山玄武岩的REE、Nb、Zr等与TiO<sub>2</sub>含量呈正相关(图4),研究区峨眉山玄武岩也表现为高钛和高REE、Nb、Zr等特征。

扫描电镜分析发现,玄武岩基质除了斜长石、单斜辉石和Fe-Ti氧化物等微晶之外,在这些微晶矿物之间还发现有填隙状石英(图5a);另外,晶间还发育一种自形长柱状、六边形结构的磷灰石(图5a),这种磷灰石富F、低Cl(表3)。研究区玄武岩基质中普遍发育椭石(图5b~5f),呈它形片状被斜



前人数据引自: Qi and Zhou(2008) Song等(2008) Lai等(2012) Li等(2017) Tian等(2017)。其他地区及夏威夷玄武岩数据引自地质数据库: <http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de>。蓝色和粉红色粗实线分别为2个峨眉山高钛苦橄岩样品(YY13-113,EM-70)的浅部岩浆房分离结晶 Melts 软件模拟计算结果(Ghiorso and Sack, 1995),蓝线为苦橄岩在压力为400 MPa  $f_{O_2}$  为QFM条件下结晶,粉红色线为苦橄岩在压力为400 MPa  $f_{O_2}$  为QFM+1条件下结晶

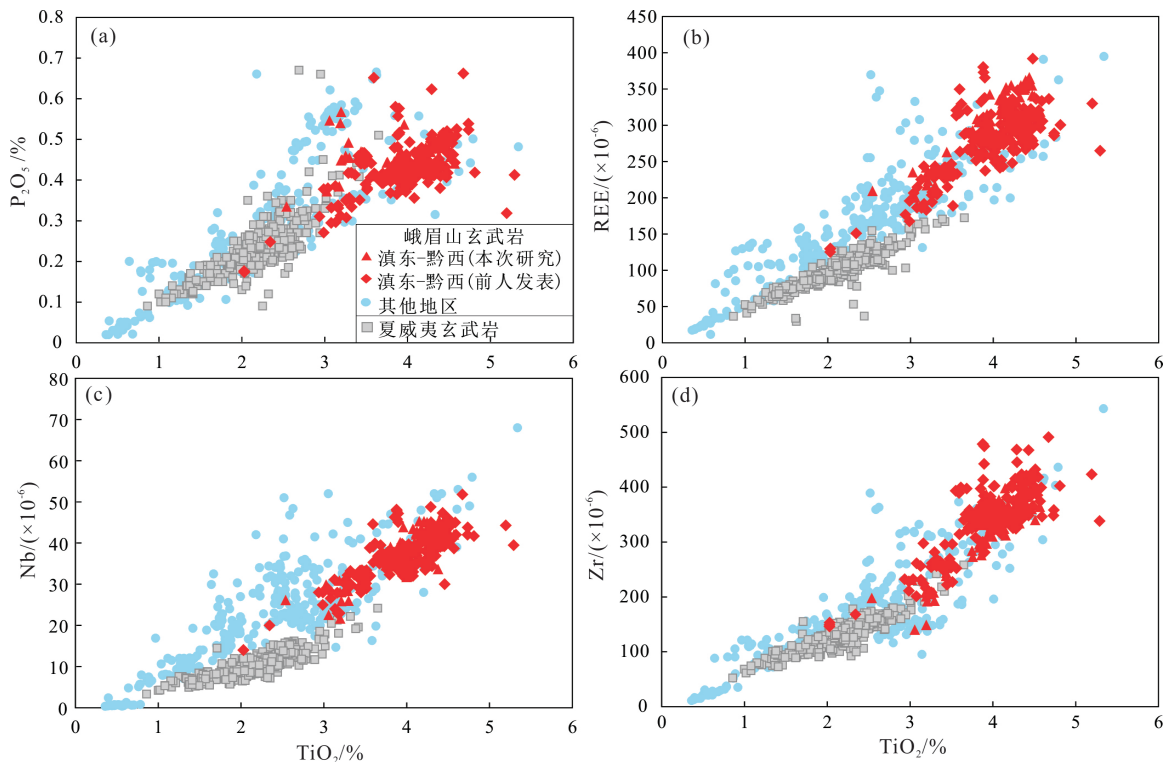
图2 滇东-黔西地区峨眉山玄武岩及其他地区玄武岩的MgO与其他主要元素相关图解



数据来源同图 2。蓝色和粉红色粗实线为 Melts 软件模拟的浅部岩浆房矿物分离结晶结果。蓝线为苦橄岩在 400 MPa  $f_{O_2}$  为 QFM 条件下结晶，粉红色线为苦橄岩在 400 MPa  $f_{O_2}$  为 QFM+1 条件下结晶

图 3 滇东-黔西地区峨眉山玄武岩及其他地区玄武岩的 MgO 与主要成矿元素相关图解

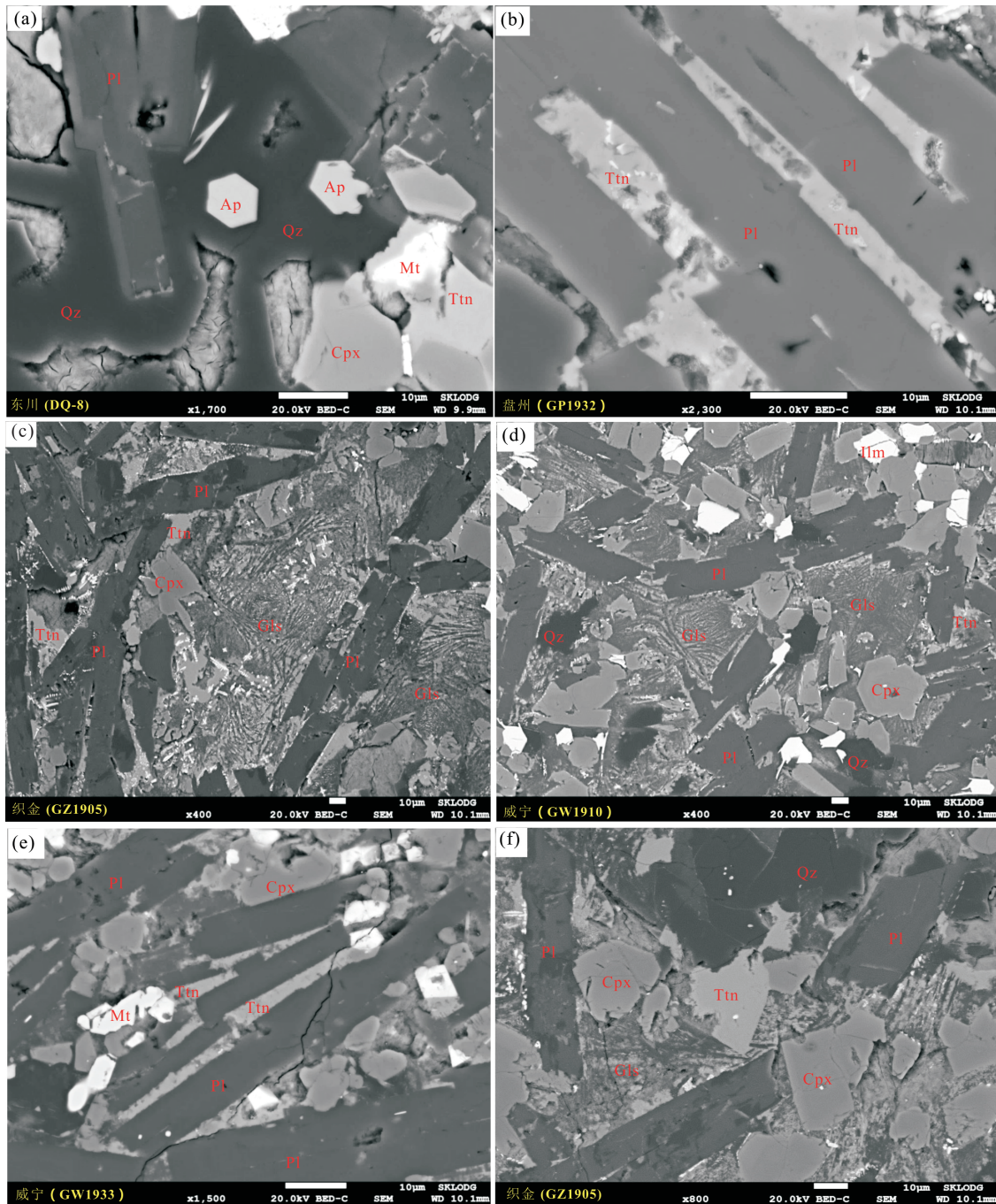
Fig.3 MgO vs. Ce, Yb, Nb and Zr for the Emeishan basalts from the Diandong-Qianxi region



数据来源同图 2

图 4 滇东-黔西地区峨眉山玄武岩及其他地区、夏威夷玄武岩的  $TiO_2$  与其他主、微量元素相关图解

Fig.4  $TiO_2$  vs.  $P_2O_5$ , REE, Nb and Zr for the Emeishan basalts from the Diandong-Qianxi region



基质具有间隐结构,斜长石格架中的玻璃质已发生黏土化,代表岩浆喷发前后结晶之后的晶间残余熔体;东川样品中磷灰石常见(a),盘州、织金和威宁样品中的榧石较普遍(b~f)。矿物符号:Pl-斜长石,Cpx-单斜辉石,Gls-隐晶质/玻璃质,Qz-石英,Ilm-钛铁矿,Mt-磁铁矿,Ttn-榧石,Ap-磷灰石  
图5 滇东-黔西地区峨眉山玄武岩样品中基质的背散射(BSE)照片

Fig.5 Back Scattered Images (BSE) for the matrixes of samples of the Emeishan basalts from the Diandong-Qianxi region

长石包裹(图5b、5e)或为半自形信封状(图5f),部分榧石出现在磁铁矿边缘(图5a),这些形态不同的榧石都含有较高的 $Nb_2O_5$ (0.01%~0.10%)(表4)。另外,杜胜江等(2019)对研究区榧石的电子探针分析表明,榧石具有较高的 $Nb_2O_5$ (0.01%~0.10%)、 $ZrO_2$ (0.03%~0.22%)和 $Ce_2O_3$ (0.09%~0.25%)含

量,本次研究与该结果一致。然而,由于榧石和磷灰石颗粒太小(直径小于 $10\mu m$ ),本次没有进行激光原位微量元素成分的精确测定。

大部分样品中都发现斜长石微晶间隙中存在大量的隐晶质和玻璃质,未发现独立矿物,但其成分分布不均匀(图5c、5d)。对这些隐晶质和玻璃质

表3 滇东-黔西地区峨眉山玄武岩中磷灰石  
电子探针分析结果

Table 3 Major elements compositions of apatites in  
Emeishan basalts from the Diandong-Qianxi area(%)

产地 样品号	东川 DQ-8	织金 GZ1902	盘州 GP1932AP	威宁 GW1933
FeO	0.91	0.91	13.17	13.69
CaO	50.77	51.00	7.55	26.07
SiO <sub>2</sub>	3.33	3.11	62.53	24.43
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	39.49	40.28	0.72	20.45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.11	0.81	4.67	4.13
MnO	0.04	0.04	0.24	0.14
Na <sub>2</sub> O	0.19	0.13	0.37	0.09
MgO	0.15	0.42	5.57	3.73
K <sub>2</sub> O	0.23	0.12	0.63	0.16
F	3.48	3.61	0	2.12
Cl	0.13	0.14	0	0.07
总计	98.32	99.00	95.46	94.17

的电子探针分析表明(表5),其具有高 SiO<sub>2</sub>(51%~64%)、Na<sub>2</sub>O(2.2%~6.5%)、K<sub>2</sub>O(1.8%~6.8%)、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(0.3%~1.7%)、低 MgO(0.2%~2.3%) 的特征。本文对2个代表性样品(GZ1905, GW1910)中的斜长石微晶格架中的隐晶质和玻璃质进行了激光微区原位微量元素成分分析,结果表明,其微量元素配分模式和玄武岩全岩的基本一致(图6,表6),不相容元素(如 REE, Nb, Zr, Ga 等)含量显著高于全岩。GZ1905 和 GW1910 的全岩 REE 含量为 355×10<sup>-6</sup>~362×10<sup>-6</sup>, Nb 含量为 41.6×10<sup>-6</sup>~45.5×10<sup>-6</sup>, Zr 含量为 347×10<sup>-6</sup>~398×10<sup>-6</sup>, Ga 含量为 23.5×10<sup>-6</sup>~25.5×10<sup>-6</sup>。与之形成鲜明对比的是其晶间玻璃质的 REE 含量高达 550×10<sup>-6</sup>~780×10<sup>-6</sup>, Nb 含量为 48×10<sup>-6</sup>~166×10<sup>-6</sup>, Zr 含量为 470×10<sup>-6</sup>~991×10<sup>-6</sup>, Ga 含量为 34×10<sup>-6</sup>~65×10<sup>-6</sup>。晶间玻璃质的不相容元素的含量约为全岩的2~3倍(图7)。

## 4 成因讨论

### 4.1 研究区峨眉山玄武岩全岩主、微量成分控制因素

与夏威夷玄武岩和峨眉山其他地区峨眉山玄武岩相比,滇东-黔西地区峨眉山玄武岩的 MgO 含量更低(<6%), TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量更高, REE、Nb、Zr、Ga 等高度不相容元素富集(图2~4)。这说明该区峨眉山玄武岩比其他地区玄武岩经历了更高层次的矿物(如橄榄石、辉石、斜长石等)分离结晶作用(O'Hara and Herzberg, 2002)。为了精确评估分离结晶作用对滇东-黔西地区峨眉山玄武岩成分的影响,本文选取峨眉山大火成岩省2个代表性

的高钛苦橄质火山岩(EM70, YY13-113), 采用 Melts 软件进行矿物分离结晶过程的模拟计算(Ghiorso and Sack, 1995)。结晶压力为400 MPa, 相对氧逸度  $f_{O_2}$  为 QFM 至 QFM+1。模拟结果表明(图2), 早期的橄榄石和斜方辉石结晶导致岩浆镁含量迅速降低(MgO 含量降至 10%~12%), 而 TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、Na<sub>2</sub>O、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量逐渐升高。之后单斜辉石开始结晶, 导致 MgO 含量继续降低至~5%, CaO 含量从 13%降低至~8%, TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量继续升高。最后 Fe-Ti 氧化物、斜长石开始结晶, MgO 和 CaO 含量继续降低, TiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量开始逐渐降低, 而 Na<sub>2</sub>O 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量持续升高。根据 Melts 模拟计算结果, 滇东-黔西地区峨眉山玄武岩可能经历了橄榄石、斜方辉石、单斜辉石、斜长石和 Fe-Ti 氧化物的大量结晶, 最后形成低镁、富铁的高度演化的岩浆, 该计算结果与前人认为的高钛玄武岩所具有的 Fenner 分异演化趋势的认识是一致的(徐义刚等, 2003)。另外, 模拟计算结果未发现有榍石、磷灰石或石英结晶, 这说明上述矿物在玄武质岩浆中无法达到饱和, 扫描电镜观察到的榍石、磷灰石、石英颗粒不是玄武质岩浆直接结晶出来的。值得注意的是, 本次模拟计算只考虑无挥发分条件下岩浆分异演化的过程, 母岩浆中如果含有一定量的 H<sub>2</sub>O 或 CO<sub>2</sub>, 计算结果可能不同。另外, 岩浆喷发及挥发分逃逸通常会导致岩浆中 S、C、H、F、Cl 等亲气元素含量降低, 而 REE、Nb、Zr 等亲石元素含量基本不受影响。

根据 Melts 软件计算获得的不同矿物的结晶量以及这些矿物与熔体之间的分配系数, 进而获得分离结晶过程中微量元素含量的变化。本文计算获得了 Ce、Yb、Nb、Zr 这几个代表性微量元素含量在分离结晶过程中的变化(图3)。由于这些元素在橄榄石、斜方辉石、单斜辉石、斜长石和 Fe-Ti 氧化物的分配系数都很低(Stracke et al., 2003), 因此, 这些矿物的分离结晶导致岩浆中的 Ce、Yb、Nb、Zr 等不相容元素逐渐升高。演化程度越高的岩浆, Ce、Yb、Nb、Zr 等不相容元素就越富集。模拟计算结果表明, 矿物分离结晶过程导致 REE、Nb、Zr、Ga 等不相容元素含量不断升高, 演化晚期的岩浆较早期的岩浆更富集不相容元素。滇东-黔西地区玄武岩总体代表高镁原始岩浆演化晚期的产物(MgO<6%), 而其他地区峨眉山玄武岩以及夏威夷玄武岩 MgO 含量总体较高, 且变化范围较大(5%~30%), 代表了高镁原始岩浆不同程度分离结晶演化的产物。

表4 滇东-黔西地区峨眉山玄武岩中榍石主量元素成分分析结果

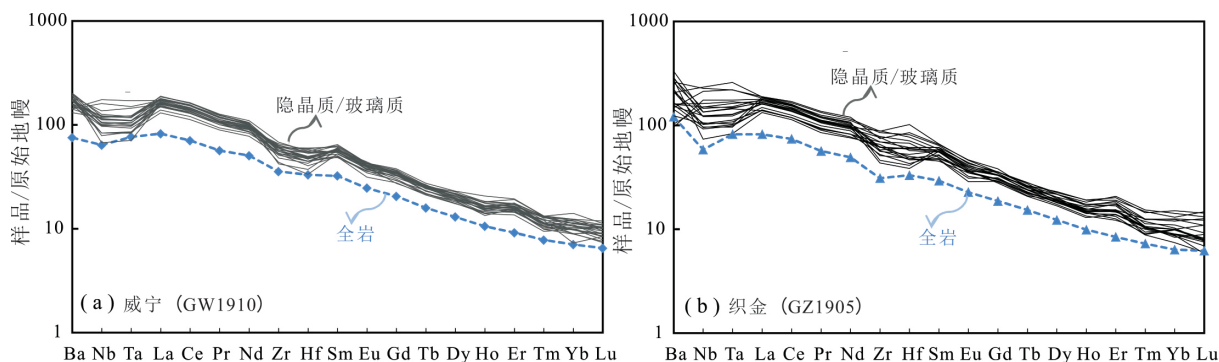
Table 4 Major elements compositions of titanites in Emeishan basalts from the Diandong-Qianxi area (%)

产地	点位	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	F	Cl	总计
东川	DQ-8-1	4.25	37.86	25.11	21.67	1.52	0.61	0.25	8.45	0.36	0.04	0.00	0.02	100.17
	DQ-8-2	3.33	32.64	30.33	25.78	0.12	0.31	0.20	4.09	0.37	0.03	0.00	0.00	97.23
	DQ-8-3	3.32	37.90	27.28	23.14	1.31	0.25	0.33	7.24	0.81	0.03	0.00	0.01	101.65
	DQ-8-4	4.12	46.33	17.27	15.11	2.28	0.56	0.14	11.79	3.08	0.02	0.00	0.01	100.73
	DQ-8-5	6.29	37.46	24.95	20.69	1.27	0.85	0.54	7.17	1.11	0.03	0.00	0.02	100.43
	DQ-8-6	3.71	37.75	26.27	22.09	1.45	0.25	0.25	7.55	0.98	0.06	0.00	0.01	100.39
	DQ-8-7	4.22	34.33	30.42	24.89	0.03	0.33	0.23	3.56	0.11	0.02	0.10	0.00	98.21
	DQ-8-8	4.38	37.83	25.47	21.82	1.45	0.67	0.19	8.31	0.36	0.03	0.00	0.01	100.52
	DQ-8-9	6.80	35.29	25.53	22.15	1.00	1.28	0.63	6.70	0.17	0.09	0.00	0.01	99.71
	DQ-8-10	4.40	31.81	31.29	25.71	0.02	0.51	0.21	3.44	0.04	0.06	0.00	0.00	97.53
盘州	GP1932-1	5.36	38.06	21.76	21.89	1.39	1.29	0.64	10.95	0.17	0.02	0.74	0.00	102.03
	GP1932-2	12.06	34.47	20.91	21.71	0.69	1.64	0.76	7.26	0.12	0.04	0.69	0.01	100.19
	GP1932-3	8.69	31.96	22.61	22.63	0.43	1.90	1.67	7.21	0.18	0.05	0.69	0.01	97.84
	GP1932-4	6.76	36.00	21.47	22.64	0.90	1.39	1.33	9.24	0.13	0.04	1.10	0.01	100.57
	GP1932-5	19.16	50.89	2.48	16.59	0.90	9.05	0.27	6.40	0.08	0.00	0.00	0.00	106.22
	GP1932-6	4.90	38.16	24.55	23.48	0.11	0.97	1.35	5.81	0.09	0.03	0.80	0.01	99.95
	GP1932-7	6.39	33.74	22.32	23.76	0.74	1.03	1.69	8.57	0.14	0.07	0.87	0.01	99.04
	GP1932-8	5.18	30.83	26.02	26.56	0.26	0.94	2.69	5.72	0.04	0.06	0.92	0.01	98.88
	GP1932-9	6.94	37.74	18.19	19.19	0.90	1.16	1.81	9.86	0.99	0.04	0.59	0.00	97.22
	GP1932-10	13.44	36.03	15.16	15.76	1.02	3.32	1.62	10.59	0.81	0.04	0.09	0.00	97.94
	GP1932-11	5.33	38.01	20.41	20.40	1.43	1.18	0.60	11.21	0.21	0.06	0.44	0.00	99.17
	GP1932-12	7.14	35.10	23.47	22.25	0.77	1.63	0.93	8.10	0.12	0.05	0.33	0.00	99.79
	GP1932-13	8.46	33.34	22.74	21.83	0.60	1.23	1.38	7.06	0.15	0.07	0.50	0.01	97.20
威宁	GW193-13	8.83	32.67	26.49	22.60	0.16	1.14	0.77	4.67	0.66	0.04	0.14	0.00	98.19
	GW193-23	7.27	31.45	29.16	23.50	0.24	1.34	0.48	4.25	0.17	0.05	0.00	0.00	97.97
	GW193-33	7.71	35.09	26.37	21.75	0.46	1.13	0.43	6.17	1.00	0.06	0.26	0.00	100.34
	GW193-43	7.49	32.59	27.89	22.85	0.36	1.38	0.43	5.05	0.36	0.07	0.00	0.00	98.51
	GW193-53	6.21	33.28	28.30	22.54	0.10	1.22	0.50	4.54	1.13	0.02	0.00	0.00	97.87
	GW193-63	9.26	35.63	22.95	19.49	0.73	1.87	0.21	7.84	0.39	0.06	0.00	0.00	98.47
	GW193-73	7.11	33.77	25.44	21.78	0.51	1.22	0.67	6.05	0.81	0.04	0.11	0.00	97.52
	GW193-83	10.49	33.57	22.26	22.15	0.10	2.89	2.21	4.82	0.43	0.06	0.00	0.01	99.14
	GW193-93	11.04	32.15	26.19	20.83	0.08	1.78	0.55	4.43	0.13	0.04	0.08	0.00	97.28
	GW193-103	11.63	39.17	19.56	15.92	0.42	1.90	0.35	7.51	2.10	0.02	0.05	0.00	98.67
	GW193-113	9.34	34.05	25.22	21.88	0.27	1.61	0.73	4.86	0.81	0.02	0.00	0.00	98.86
	GW193-123	4.28	42.45	20.65	17.83	1.11	0.59	0.55	9.69	3.68	0.07	0.35	0.00	101.12
	GW193-133	5.84	36.73	24.34	21.36	0.94	1.12	0.72	7.50	1.27	0.05	0.11	0.00	99.97
	GW193-143	12.50	31.34	25.67	20.94	0.05	2.13	0.45	4.93	0.39	0.03	0.00	0.01	98.57
	GW193-153	8.82	34.72	22.84	19.28	0.39	1.52	0.72	7.14	1.90	0.04	0.00	0.00	97.42
	GW193-163	6.03	31.60	29.87	24.34	0.07	0.76	0.47	4.07	0.29	0.05	0.41	0.00	97.82
	GW193-173	5.25	40.64	20.08	17.85	0.70	0.77	0.51	9.36	3.34	0.05	0.33	0.01	98.79
GW193-183	7.47	32.67	27.78	23.25	0.23	1.92	0.98	4.62	0.35	0.04	0.00	0.00	99.36	
织金	GZ1905-1	3.96	30.79	33.88	26.87	0.00	0.39	0.22	2.11	0.02	0.02	0.00	0.00	98.35
	GZ1905-2	3.71	31.55	33.81	26.80	0.07	0.37	0.25	1.94	0.02	0.05	0.00	0.00	98.65
	GZ1905-3	3.96	32.00	33.86	26.53	0.05	0.49	0.15	2.15	0.02	0.02	0.03	0.00	99.33
	GZ1905-4	5.91	30.88	29.45	26.46	0.06	0.45	1.08	3.53	0.05	0.03	0.87	0.02	98.43
	GZ1905-5	4.32	30.94	33.83	26.12	0.00	0.54	0.32	2.12	0.03	0.03	0.00	0.00	98.31
	GZ1905-6	4.09	32.64	33.57	26.04	0.01	0.49	0.21	2.25	0.04	0.02	0.00	0.00	99.40
	GZ1905-7	4.58	32.32	33.30	25.88	0.02	0.77	0.27	2.32	0.02	0.02	0.00	0.00	99.56
	GZ1902-1	6.64	31.10	29.53	23.81	0.02	1.62	0.12	4.21	0.03	0.01	0.15	0.00	97.27
	GZ1902-2	6.87	32.80	26.84	23.08	0.00	1.75	0.31	5.10	0.46	0.04	0.30	0.00	97.48
	GZ1902-3	3.96	30.87	33.12	26.19	0.10	0.71	0.17	2.87	0.02	0.08	0.00	0.00	98.20
GZ1902-4	4.18	31.60	30.15	25.80	0.00	0.75	0.38	4.24	0.09	0.01	0.38	0.01	97.52	

表 5 滇东-黔西地区峨眉山玄武岩中隐晶质/玻璃质主量元素成分分析结果

Table 5 Major element compositions of glass in Emeishan basalts from the Diandong-Qianxi area (%)

产地	样品号	点位	FeO	MnO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	CaO	总量
盘州	GP1932	1	4.51	0.03	1.87	3.99	57.90	1.03	17.86	1.06	5.64	5.11	98.98
	GP1932	2	1.65	0.04	0.68	4.68	63.87	0.43	19.65	0.17	6.21	3.73	101.11
织金	GZ1905	1	13.64	0.17	3.52	3.51	53.66	1.57	11.87	1.68	1.86	5.84	97.32
	GZ1905	2	9.07	0.09	3.54	3.39	59.23	1.73	11.10	1.20	1.85	6.29	97.50
	GZ1905	3	8.70	0.10	1.90	3.41	54.24	0.47	16.35	2.32	5.25	2.88	95.62
	GZ1905	4	10.57	0.15	1.43	3.25	57.48	0.67	14.84	2.62	3.45	2.60	97.06
	GZ1905	5	4.80	0.08	1.10	5.95	59.54	0.63	17.38	1.19	2.82	2.75	96.24
	GZ1905	6	4.75	0.07	4.31	5.47	56.75	0.66	15.91	1.24	2.39	5.53	97.07
	GZ1905	7	7.49	0.13	3.98	4.27	54.89	0.45	16.08	1.82	3.66	5.04	97.83
	GZ1905	8	8.21	0.12	2.25	2.27	54.60	0.91	16.26	2.30	6.36	3.65	96.92
	GZ1905	9	6.05	0.08	5.35	2.82	53.01	1.00	15.20	1.39	5.30	7.17	97.36
	GZ1905	10	5.99	0.09	1.32	5.70	58.34	0.55	17.71	1.48	3.38	3.01	97.56
	GZ1905	11	14.51	0.15	3.39	4.24	51.35	1.02	15.88	2.32	3.38	5.20	101.44
	GZ1905	12	4.36	0.06	0.77	6.55	60.45	0.67	17.75	1.12	3.07	2.56	97.37
	GZ1905	13	8.06	0.11	1.39	2.38	56.80	0.31	16.91	2.14	6.43	2.59	97.11
威宁	GW1910	1	4.85	0.03	2.07	3.17	55.15	1.32	16.75	1.21	5.22	5.55	95.34
	GW1910	2	2.90	0.00	1.55	4.21	59.03	1.23	18.10	0.57	5.61	5.17	98.38
	GW1910	3	3.89	0.01	1.09	3.58	57.88	1.21	18.46	0.91	5.53	5.20	97.77
	GW1910	4	4.62	0.02	1.06	3.52	56.98	1.36	18.30	1.16	5.46	5.49	97.97
	GW1910	5	4.92	0.03	1.69	3.65	58.27	0.74	17.96	1.37	5.65	4.71	99.00
	GW1910	6	2.43	0.03	1.18	4.03	61.94	0.94	18.71	0.54	5.76	4.37	99.94
	GW1910	7	2.20	0.01	1.93	3.96	60.40	0.92	18.51	0.46	6.01	5.81	100.22
	GW1910	8	2.39	0.00	2.27	4.00	59.53	1.18	18.15	0.54	6.10	6.05	100.22
	GW1910	9	4.54	0.01	1.00	3.79	58.01	1.12	18.58	1.21	5.31	5.10	98.66
	GW1910	10	2.81	0.02	1.55	3.56	59.96	1.12	18.31	0.56	6.07	5.23	99.19
	GW1910	11	4.01	0.04	0.82	3.59	60.71	0.98	18.62	0.94	6.62	4.12	100.44
	GW1910	12	7.07	0.05	1.64	2.87	55.28	0.98	15.88	1.59	5.51	4.91	95.77
	GW1910	13	6.54	0.06	1.70	3.40	56.00	1.30	17.83	1.26	5.14	5.49	98.72
	GW1910	14	4.42	0.03	0.77	3.44	59.99	1.33	18.02	1.06	6.79	4.29	100.14



原始地幔数据引自 Sun 和 McDonough (1989)

图 6 滇东-黔西地区玄武岩代表性样品中斜长石微晶格架间隙中的隐晶质/玻璃质微量元素配分模式图

Fig.6 Primitive mantle-normalized incompatible elements patterns of the intersertal aphanitic/glassy materials within the matrixes of microcrystal plagioclases



表 6 滇东-黔西地区峨眉山玄武岩中隐晶质/玻璃质微量元素成分分析结果

Table 6 Trace element compositions of glass in Emeishan basalts from the Diandong-Qianxi area ( $\times 10^{-6}$ )

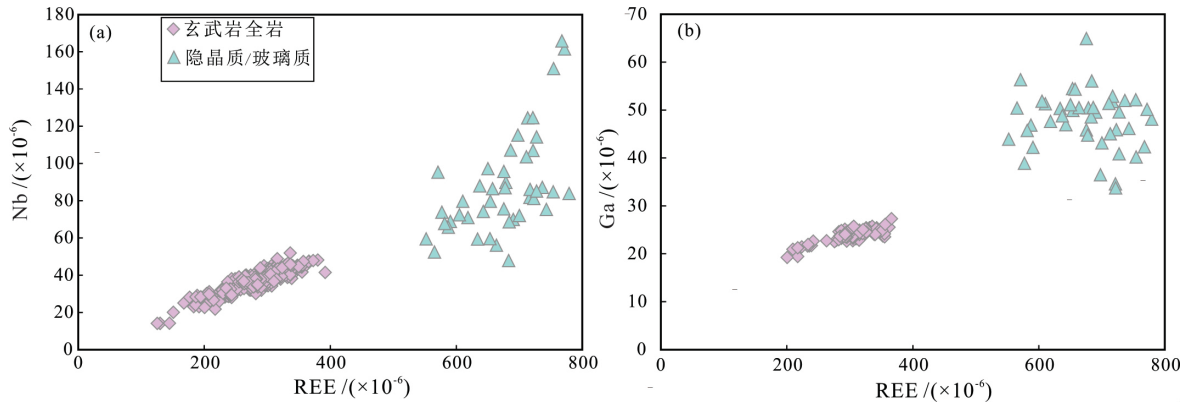
样品号	点位	Ga	Rb	Sr	Zr	Nb	Ba	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta
GW1910 威宁	1	50.4	105	227	594	89.8	1368	62.3	113	258	31.0	130	25.2	6.75	19.6	2.76	14.0	2.32	7.05	0.78	4.79	0.66	14.6	4.92
	2	51.7	84.7	204	620	81.7	1209	69.8	120	269	32.0	138	25.2	6.81	19.5	2.71	15.8	2.74	7.92	0.94	6.07	0.75	15.3	4.52
	3	49.9	91.9	189	596	79.6	1163	62.8	108	245	29.9	125	24.4	6.56	18.5	2.65	14.3	2.53	7.87	0.85	4.41	0.68	13.8	4.49
	4	49.5	91.7	195	641	69.9	1195	71.4	111	256	30.1	132	25.8	6.64	20.5	2.75	15.9	3.01	8.36	0.82	5.35	0.66	14.4	4.01
	5	51.3	88.5	218	665	79.6	1363	59.4	102	228	27.7	115	23.1	6.37	17.9	2.36	13.3	2.31	7.18	0.73	4.91	0.62	15.0	4.51
	6	43.1	76.4	189	624	71.9	1114	70.5	117	260	31.1	133	25.7	6.54	20.1	2.72	15.0	2.72	8.43	0.98	5.86	0.71	13.7	4.26
	7	42.2	83.9	184	618	68.8	1067	64.4	95	213	25.7	112	21.5	5.97	19.3	2.63	14.6	2.44	7.38	0.75	5.04	0.75	14.7	3.81
	8	50.3	100.0	204	586	59.4	1215	68.3	106	231	27.6	121	22.0	6.05	17.2	2.52	14.1	2.52	8.48	0.83	5.35	0.62	12.5	3.40
	9	50.5	104.0	216	670	56.0	1333	70.2	109	240	28.5	127	25.0	7.06	20.5	2.69	16.0	2.87	7.78	0.83	4.90	0.75	15.3	3.49
	10	51.1	80.0	222	736	97.1	1286	65.4	108	241	28.6	122	24.0	6.70	19.5	2.47	14.5	2.69	7.50	0.82	5.62	0.80	17.7	5.91
	11	48.5	117.0	215	715	47.8	1346	76.8	110	246	29.7	129	24.6	6.55	21.0	2.77	16.7	2.98	9.15	0.97	6.93	0.83	16.6	2.90
	12	43.9	86.2	185	573	59.5	1111	60.1	89	199	24.6	105	21.8	5.27	16.5	2.28	12.8	2.39	6.89	0.78	4.44	0.54	13.7	3.51
	13	52.8	88.3	233	621	86.0	1410	63.9	123	277	32.2	136	26.1	6.90	20.2	2.87	14.5	2.48	7.24	0.89	3.59	0.62	15.0	4.97
	14	54.4	77.8	195	488	59.5	1256	58.8	115	252	29.3	122	23.4	6.53	16.2	2.34	12.9	2.28	6.51	0.70	4.87	0.58	10.3	3.45
	15	52.0	65.0	191	470	87.1	1114	62.5	130	287	34.4	139	25.4	7.37	19.4	2.50	13.7	2.19	7.50	0.73	4.38	0.56	11.5	4.80
	16	47.6	85.2	190	572	70.9	1230	62.7	103	230	28.5	117	22.3	5.78	17.4	2.32	13.7	2.57	6.90	0.91	4.78	0.63	13.8	3.96
	17	45.9	59.3	175	535	81.1	991	67.2	122	273	32.7	139	26.7	6.26	20.3	2.81	15.7	2.62	7.72	0.79	5.23	0.74	13.1	4.45
	18	46.9	113.0	228	705	74.1	1327	66.6	103	236	28.9	123	24.5	6.18	19.2	2.72	14.1	2.68	8.13	0.95	5.51	0.75	17.0	4.09
	19	49.6	83.7	208	666	85.1	1189	74.7	122	273	32.7	134	26.0	7.12	20.9	2.61	16.2	2.91	8.39	0.97	5.57	0.77	14.8	4.81
	20	45.8	93.6	211	690	75.6	1259	70.2	112	248	29.6	128	24.1	6.61	20.8	2.68	15.0	2.68	8.21	0.89	5.85	0.73	16.4	4.29
	21	45.0	55.2	206	676	124.0	1008	63.6	118	272	32.9	137	27.1	6.90	21.1	2.80	15.0	2.58	7.37	0.81	4.81	0.66	18.4	7.00
	22	40.8	63.7	154	671	114.0	996	68.1	118	273	33.9	141	27.8	7.10	21.8	2.83	16.1	2.71	7.59	0.84	5.98	0.81	18.1	6.13
	23	52.1	66.0	181	641	84.7	1207	71.1	128	285	34.4	143	27.9	7.20	21.4	2.66	15.4	2.56	7.84	0.96	5.20	0.70	16.6	4.99
	24	48.1	38.2	156	761	83.8	915	79.7	128	289	35.0	149	28.6	7.19	22.5	2.95	16.9	3.38	9.28	0.98	6.08	0.88	17.2	5.02

续表6

产地	样品号	点位	Ga	Rb	Sr	Zr	Nb	Ba	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta
	1		50.1	39.4	156	832	161.0	1821	53.2	129.0	300	37.6	162	29.0	7.8	22.6	2.73	13.9	2.38	6.35	0.65	3.65	0.44	26.3	8.97
	2		44.7	32.4	194	857	86.9	1480	76.7	111.0	246	29.1	124	24.4	6.38	19.6	2.58	15.9	2.98	9.94	1.13	7.00	0.97	17.6	5.20
	3		54.3	46.0	152	626	86.3	2019	57.1	110.0	245	29.8	132	25.1	6.58	19.8	2.57	14.2	2.41	7.08	0.78	4.10	0.66	16.2	5.04
	4		38.8	20.7	147	689	73.7	860	66.8	94.6	210	24.7	105	20.8	4.80	17.2	2.27	13.8	2.57	7.33	0.92	5.88	0.93	15.5	4.59
	5		34.6	10.5	182	646	125.0	666	59.8	123.0	276	33.5	142	27.2	7.35	20.5	2.70	14.9	2.41	7.17	0.75	4.41	0.58	18.8	7.15
	6		36.4	26.3	142	991	115.0	1122	80.9	110.0	252	29.9	130	26.2	6.79	21.0	3.02	16.5	3.13	9.62	1.06	7.40	1.06	23.7	6.91
	7		33.7	23.3	160	874	107.0	1115	78.5	118.0	264	32.5	137	24.5	6.01	21.3	2.84	16.9	3.12	9.13	1.09	6.41	1.09	21.9	6.65
	8		46.8	19.1	135	696	65.7	996	66.8	96.3	210	25.3	111	20.9	5.19	18.6	2.43	14.1	2.68	8.30	0.79	4.92	0.81	14.3	4.03
	9		51.4	47.4	151	691	103.0	1963	61.3	121.0	272	33.1	141	25.6	6.64	19.9	2.82	13.7	2.34	6.02	0.67	4.91	0.56	18.5	6.20
	10		46.1	24.9	153	514	75.2	1155	67.1	128.0	283	33.4	145	26.2	6.95	19.7	2.78	15.0	2.85	8.05	0.78	4.24	0.51	12.7	4.23
	11		50.4	53.0	161	731	52.4	1930	69.2	91.0	201	23.4	102	20.0	5.84	17.8	2.39	13.7	2.54	8.38	0.91	6.20	0.90	14.8	3.40
	12		40.2	21.9	141	952	151.0	1029	70.2	126.0	279	34.5	150	28.3	7.18	21.2	3.03	16.0	2.83	8.62	0.83	5.41	0.68	25.1	9.01
	13		45.7	39.0	130	586	67.7	1553	60.1	95.7	211	25.4	111	22.6	5.99	18.0	2.57	13.3	2.44	7.38	0.76	4.44	0.61	13.2	4.14
	14		56.0	26.6	112	486	68.6	1099	60.1	121.0	260	30.6	131	24.9	5.87	18.2	2.47	13.2	2.40	7.35	0.66	4.83	0.58	11.9	3.93
	15		48.8	28.1	115	572	87.9	1067	56.0	110.0	241	29.5	127	23.0	5.42	17.4	2.35	12.7	2.19	5.85	0.74	4.29	0.43	14.8	5.25
	16		51.8	35.7	151	639	72.3	1474	60.8	102.0	222	27.3	120	21.3	6.15	16.6	2.24	12.3	2.12	6.60	0.76	4.91	0.60	14.4	4.41
	17		42.3	28.2	188	978	166.0	1442	62.5	129.0	292	36.7	155	29.3	7.71	21.1	2.96	14.5	2.56	7.00	0.88	5.04	0.57	31.4	10.60
	18		50.5	14.3	108	776	107.0	716	70.8	113.0	252	30.4	129	27.1	6.37	19.7	2.82	15.9	2.77	8.93	0.92	6.11	0.80	18.9	6.06
	19		64.9	56.3	159	684	95.7	2325	57.5	114.0	255	31.0	134	25.0	6.20	19.6	2.60	14.1	2.48	7.27	0.69	4.85	0.59	18.2	
	20		56.3	48.4	145	771	95.2	1813	54.3	94.7	210	25.8	111	21.7	6.06	16.9	2.45	13.4	2.32	6.65	0.78	4.35	0.56	20.7	
	实测值		30.77	45.67	119	179	11.75	668	33.77	25.21	52.66	6.58	26.98	6.91	2.04	6.69	1.03	6.27	1.30	4.13	0.45	3.09	0.45	4.91	
	推荐值		23	47	342	184	12.5	683	35	24.70	53.30	6.70	28.9	6.59	1.97	6.71	1.02	6.44	1.27	3.70	0.51	3.39	0.50	4.84	
	实测值		22.42	8.58	95	159	16.46	132	22.96	14.77	35.97	4.76	23.38	5.68	1.95	6.0	0.86	5.14	0.90	2.94	0.27	2.02	0.30	4.03	
	推荐值		22	9.2	396	170	18.3	131	26	15.2	37.6	5.35	24.5	6.1	2.07	6.16	0.92	5.28	0.98	2.56	0.34	2.01	0.28	4.32	

标准

注: 标准为玄武质玻璃, 推荐值引自 GeoReM (<http://gsorem.mpch-mainz.gwdg.de/>)。



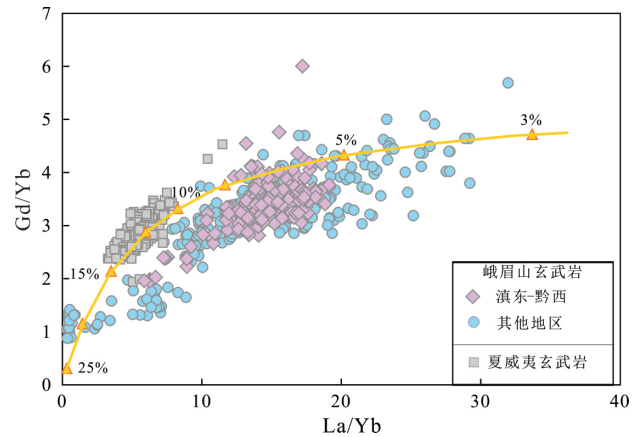
隐晶质/玻璃质来自威宁和盘州 2 个代表性玄武岩样品 (GW1910 和 GZ1905)

图 7 滇东-黔西地区峨眉山玄武岩样品全岩与斜长石微晶格架间隙中的隐晶质/玻璃质的 REE-Nb-Ga 含量变化图解

Fig.7 Plots of REE-Nb and REE-Ga contents of the bulk rocks and the intersertal aphanitic/glassy materials with in the matrixes of microcrystal plagioclases for samples of the Emeishan basalts in the Diandong-Qianxi region

值得注意的是,在相同 MgO 含量情况下,滇东-黔西地区玄武岩的 LREE、Nb、Zr 含量显著高于夏威夷玄武岩(图 3)。然而,在相同 MgO 含量情况下,滇东-黔西地区玄武岩的 LREE、Nb、Zr 含量与其他地区峨眉山玄武岩类似。这说明滇东-黔西地区玄武岩 REE、Nb、Zr、Ga 等元素的相对富集是由于大量矿物分离结晶作用造成的。岩浆演化程度越高,LREE、Nb、Zr、Ga 等不相容元素含量越富集。值得注意的是 HREE 和 Y 在分离结晶过程中只是轻度富集,因此玄武岩中的 HREE 和 Y 含量通常较低。

另外,已有研究表明,峨眉山玄武岩主要源于地幔柱物质的部分熔融,部分程度高低也是影响岩浆成分变化的重要因素(Xu et al., 2001; Xiao et al., 2004)。一般地幔柱较低程度的部分熔融形成的岩浆,其 REE、Nb、Zr、Ga 等不相容元素的含量更高(Xu et al., 2001)。由于滇东-黔西地区峨眉山玄武岩 MgO 含量较低,并发生了橄榄石、斜方辉石、单斜辉石、斜长石和 Fe-Ti 氧化物的分离结晶,因此无法直接用来计算原始岩浆成分。La/Yb 和 Gd/Yb 值受分离结晶影响较小,可以用来评估地幔部分熔融程度对全岩微量元素的影响。本文计算了具有原始地幔微量元素组成的石榴子石相橄榄石地幔发生批式熔融时熔体 La/Yb 和 Gd/Yb 的变化,结果如图 8 所示,可见研究区峨眉山玄武岩经历了约 5%~10% (质量分数) 的部分熔融,低于夏威夷玄武岩(质量分数 10%~15% 的部分熔融)、而与峨眉山大火成岩省其他地区玄武岩(质量分数约 3%~25% 的部分熔融)没有显著差别,因此部分熔融并非滇东-黔西地区峨眉山玄武岩全岩 REE、Nb、Zr、Ga 等



数据来源同图 2。黄色曲线代表具有原始地幔微量元素组成的石榴子石相橄榄岩地幔发生批式熔融时熔体 La/Yb 和 Gd/Yb 的变化范围,矿物/熔体分配系数、起始熔融橄榄岩矿物含量、熔融模式引自 Stracke 等(2003)。曲线旁边的数字代表部分熔融程度。原始地幔 La、Yb、Gd 含量引自 Sun 和 McDonough (1989)

图 8 滇东-黔西地区峨眉山玄武岩全岩 La/Yb 和 Gd/Yb 变化

Fig.8 Variations of La/Yb vs. Gd/Yb ratios for bulk rocks of the Emeishan basalts from the Diandong-Qianxi region

不相容元素富集的主要控制因素。

#### 4.2 研究区峨眉山玄武岩 Nb-Ga-REE 赋存状态

陆相喷发的玄武岩通常由斑晶和基质两部分组成,其中斑晶矿物为岩浆在岩浆通道向上运移过程中达到饱和的液相线矿物,大部分矿物发生结晶分离并留在地壳内或壳/幔边界的岩浆房中,少量矿物以斑晶形式被熔体携带至地表。基质由微米或纳米级微晶矿物和隐晶质/玻璃质组成,是玄武岩岩浆喷出地表后冷凝过程中快速结晶的产物,它记录了岩浆固结成岩时的物理化学条件及成岩过程中岩浆的演化过程(陈小明等,1999)。另外,玄

玄武岩喷发后的风化蚀变作用可导致玄武岩发生脱玻化以及形成次生矿物。如上所述, Melts 模拟计算结果表明, 峨眉山苦橄质岩浆在演化晚期没有结晶出榍石和磷灰石, 说明上述矿物在玄武质岩浆中无法达到饱和。另外, 扫描电镜观察到的榍石和磷灰石并非斑晶矿物, 而是基质中斜长石微晶格架间隙中的微米或纳米颗粒, 也说明这两种矿物在玄武岩喷出地表之前未达到饱和。考虑到玄武岩主要的结晶矿物橄榄石、辉石、斜长石和 Fe-Ti 氧化物中的 Nb、Ga、Zr、REE 含量极低(Chen et al., 2017), 因此可以推断, 在晚二叠纪这些不相容元素应主要赋存于峨眉山玄武岩基质中。

本文通过扫描电镜观察及电子探针成分分析, 确认滇东-黔西地区峨眉山玄武岩的基质主要由斜长石、单斜辉石、Fe-Ti 氧化物、磷灰石、榍石和石英及隐晶质/玻璃质组成(图 5)。其中斜长石、单斜辉石和 Fe-Ti 氧化物为玄武岩基质的主要微晶矿物, 其体积分数占基质组成到 70%~90% 左右。磷灰石、榍石和石英及隐晶质/玻璃质以填隙状产出于斜长石和单斜辉石微晶格架内, 其体积分数约占基质组成的 10%~30%(图 5)。基质中的主要组成矿物斜长石、单斜辉石和 Fe-Ti 氧化物应为玄武岩浆喷出地表后冷凝过程中快速结晶的微晶矿物, 矿物大量结晶后的残余熔体赋存于斜长石和单斜辉石微晶格架内, 以隐晶质和玻璃质代表的这些残余熔体以高 SiO<sub>2</sub> (51%~64%)、高 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0.3%~1.7%) 和低 MgO (0.2%~2.3%) 特征。磷灰石、榍石和石英在这种高度演化的熔体中达到饱和, 并最终结晶出较自形的磷灰石、榍石及填隙状石英。由于喷发速率过快, 部分未来得及结晶的熔体冷凝形成隐晶质/玻璃质。残余熔体的结晶分异程度不同会导致其成分变化巨大。由于斜长石、单斜辉石和 Fe-Ti 氧化物仅含少量的 Nb、Ga、Zr、REE (Chen et al., 2017), 而磷灰石富含 REE (She et al., 2016), 榍石富含 Nb、Zr 和 REE (Colombini et al., 2011; Xu et al., 2015; 杜胜江等, 2019), 激光原位分析表明隐晶质/玻璃质富含 Nb、Ta、Ga、Zr、Hf、REE 等元素(表 6)。例如, 晶间玻璃质的 REE 含量高达 550×10<sup>-6</sup>~780×10<sup>-6</sup>, Nb 含量为 48×10<sup>-6</sup>~166×10<sup>-6</sup>, Zr 含量为 470×10<sup>-6</sup>~991×10<sup>-6</sup>, Ga 含量为 34×10<sup>-6</sup>~65×10<sup>-6</sup>。因此, 我们推断滇东-黔西地区峨眉山玄武岩中的 Nb、Ga、Zr、REE 应赋存于基质中的磷灰石、榍石及隐晶质/玻璃质中。另外, 值得注意的是部分它形榍石产出于 Fe-Ti 氧化物的周围, 可能是磁铁矿水化和氧化作用形成的次生矿物(Shau et al.,

1993, 2000)。

#### 4.3 研究区峨眉山玄武岩风化壳对 Nb-Ga-REE 成矿的启示

在峨眉山玄武岩系顶部和宣威组第三段顶部与上二叠统宣威组第一段之间, 发育一套厚约 2~10 m 的陆相风化沉积的黏土岩、高岭石黏土岩和凝灰质黏土岩, 它们富集 REE、Nb、Zr、Ga 等元素(王伟等, 2011)。前人认为这种富 Nb-Ga-REE 的高岭石黏土岩是峨眉山大火成岩省玄武岩的风化沉积产物(黄训华, 1997; 杨瑞东等, 2006; 张正伟等, 2010)。本次研究结果显示, 研究区峨眉山玄武岩全岩的 REE、Nb、Zr、Ga 等元素的背景值要明显高于峨眉山大火成岩省其他地区玄武岩和夏威夷玄武岩, 这是由于本地区峨眉山玄武岩演化程度更高, 大量贫 REE、Nb、Zr、Ga 矿物(如橄榄石、辉石、斜长石、Fe-Ti 氧化物等)的分离结晶造成这些元素在玄武岩中发生预富集。研究区峨眉山玄武岩的高背景值是风化壳中 Nb-Ga-REE 富集成矿的重要基础。另外, 玄武岩喷发后的冷凝过程中辉石、斜长石、Fe-Ti 氧化物会发生快速结晶, 从而导致仅占基质 10%~30%(体积分数)左右的磷灰石、榍石及隐晶质/玻璃质高度富集 REE、Nb、Zr、Ga 等成矿元素。这些矿物在后期风化淋滤过程中形成黏土矿物, 并最终成为宣威组底部黏土岩中 Nb-Ga-REE 的主要成矿物质来源。

本文研究结果表明, 大范围出现低 MgO、高度演化玄武岩的地区, 其 Nb-Ga-REE 的背景值应该较高, 这为 Nb-Ga-REE 富集成矿提供了物质基础。峨眉山大火成岩省内带(如大理、丽江、攀枝花等地区)的玄武岩 MgO 变化范围很大, 既有低 MgO 的演化岩浆, 也有高 MgO 的苦橄岩, 其 Nb-Ga-REE 的平均值不高, 应不具有良好的风化壳型 Nb-Ga-REE 矿床的成矿潜力。另外, 本文推测在其他具有大面积低 MgO 玄武岩分布的地区, 特别是玄武岩分布广泛的陆内大火成岩省, 应有风化壳型 Nb-Ga-REE 矿床的成矿潜力。

## 5 结论

(1) 与夏威夷玄武岩和峨眉山其他地区玄武岩相比, 滇东-黔西地区峨眉山玄武岩 MgO 含量更低, 更富集 REE、Nb、Zr、Ga 等不相容元素, 这与橄榄石、辉石、斜长石和 Fe-Ti 氧化物的大量结晶有关。

(2) 作为基质中主要组成矿物的斜长石、单斜辉石和 Fe-Ti 氧化物应为玄武岩浆喷出地表后冷凝过程中快速结晶的微晶矿物, 矿物大量结晶后的残

余熔体赋存于斜长石和单斜辉石微晶格架内,并最终形成磷灰石、榍石和石英及隐晶质/玻璃质。滇东-黔西地区峨眉山玄武岩中的 Nb、Ga、Zr、REE 应主要赋存于基质中的磷灰石、榍石及隐晶质/玻璃质中。

(3) 滇东-黔西地区峨眉山玄武岩的 Nb-Ga-REE 高背景值是风化壳中 Nb-Ga-REE 富集成矿的重要物质基础。玄武岩喷发后的冷凝过程中辉石、斜长石、Fe-Ti 氧化物发生快速结晶,从而导致体积分数仅占基质 10%~30%的磷灰石、榍石及隐晶质/玻璃质高度富集 REE、Nb、Zr、Ga 等成矿元素。这些矿物在后期风化淋滤过程中形成黏土矿物,并最终成为宣威组底部黏土岩中 Nb-Ga-REE 的主要成矿物质来源。

致谢: 分析测试工作得到中国科学院地球化学研究所唐燕文、董少花和李响工程师的支持和帮助,在此表示衷心感谢!

#### 参考文献 (References):

- Chen L M, Song X Y, Hu R Z, Yu S Y, He H L, Dai Z H, She Y W, Xie W. 2017. Controls on trace-element partitioning among co-crystallizing minerals: Evidence from the Panzihua layered intrusion, SW China. *American Mineralogist*, 102( 5): 1006-1020
- Coffin M F, Eldholm O. 1994. Large igneous provinces: Crustal structure, dimensions, and external consequences. *Reviews of Geophysics*, 32( 1): 1-36
- Colombini L L, Miller C F, Gualda G A R, Wooden J L, Miller J S. 2011. Sphene and zircon in the Highland Range volcanic sequence ( Miocene, southern Nevada, USA): Elemental partitioning, phase relations, and influence on evolution of silicic magma. *Mineralogy and Petrology*, 102( 1-4): 29-50
- Ghiorso M S, Sack R O. 1995. Chemical mass transfer in magmatic processes IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119( 2-3): 197-212
- Hanski E, Kamenetsky V S, Luo Z Y, Xu Y G, Kuzmin D V. 2010. Primitive magmas in the Emeishan Large Igneous Province, southwestern China and northern Vietnam. *Lithos*, 119( 1-2): 75-90
- Lai S C, Qin J F, Li Y F, Li S Z, Santosh M. 2012. Permian high Ti/Y basalts from the eastern part of the Emeishan Large Igneous Province, southwestern China: Petrogenesis and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 216-230
- Li J, Zhong H, Zhu W G, Bai Z J, Hu W J. 2017. Elemental and Sr-Nd isotopic geochemistry of Permian Emeishan flood basalts in Zhaotong, Yunnan Province, SW China. *International Journal of Earth Sciences*, 106( 2): 617-630
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G, Chen H L. 2008. *In situ* analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257( 1-2): 34-43
- Luan Y, Song X Y, Chen L M, Zheng W Q, Zhang X Q, Yu S Y, She Y W, Tian X L, Ran Q Y. 2014. Key factors controlling the accumulation of the Fe-Ti oxides in the Hongge layered intrusion in the Emeishan Large Igneous Province, SW China. *Ore Geology Reviews*, 57: 518-538
- O'Hara M J, Herzberg C. 2002. Interpretation of trace element and isotope features of basalts: Relevance of field relations, petrology, major element data, phase equilibria, and magma chamber modeling in basalt petrogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66( 12): 2167-2191
- Qi L, Zhou M F. 2008. Platinum-group elemental and Sr-Nd-Os isotopic geochemistry of Permian Emeishan flood basalts in Guizhou Province, SW China. *Chemical Geology*, 248( 1-2): 83-103
- Shau Y H, Peacor D R, Essene E J. 1993. Formation of magnetic single-domain magnetite in ocean ridge basalts with implications for sea-floor magnetism. *Science*, 261( 5119): 343-345
- Shau Y H, Torii M, Hornig C S, Peacor D R. 2000. Subsolidus evolution and alteration of titanomagnetite in ocean ridge basalts from Deep Sea Drilling Project/Ocean Drilling Program Hole 504B, Leg 83: Implications for the timing of magnetization. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105( B10): 23635-23649
- She Y W, Song X Y, Yu S Y, Chen L M, Zheng W Q. 2016. Apatite geochemistry of the Taihe layered intrusion, SW China: Implications for the magmatic differentiation and the origin of apatite-rich Fe-Ti oxide ores. *Ore Geology Reviews*, 78: 151-165
- Song X Y, Qi H W, Robinson P T, Zhou M F, Cao Z M, Chen L M. 2008. Melting of the subcontinental lithospheric mantle by the Emeishan mantle plume; evidence from the basal alkaline basalts in Dongchuan, Yunnan, Southwestern China. *Lithos*, 100( 1-4): 93-111
- Song X Y, Xie W, Deng Y F, Crawford A J, Zheng W Q, Zhou G F, Deng G, Cheng S L, Li J. 2011. Slab break-off and the formation of Permian mafic-ultramafic intrusions in southern margin of Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang, NW China. *Lithos*, 127( 1-2): 128-143
- Stracke A, Bizimis M, Salters V J M. 2003. Recycling oceanic crust: Quantitative constraints. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4( 3): 8003
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society Special Publication, 42: 313-345
- Tian H C, Yang W, Li S G, Ke S. 2017. Could sedimentary carbonates be recycled into the lower mantle? Constraints from Mg isotopic composition of Emeishan basalts. *Lithos*, 292-293: 250-261
- Wang C Y, Zhou M F, Qi L. 2007. Permian flood basalts and mafic intrusions in the Jinping ( SW China) -Song Da ( northern Vietnam) district: Mantle sources, crustal contamination and sulfide segregation. *Chemical Geology*, 243( 3-4): 317-343

- Xiao L, Xu Y G, Mei H J, Zheng Y F, He B, Pirajno F. 2004. Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the western Emeishan large igneous province, SW China: Implications for plume-lithosphere interaction. *Earth and Planetary Science Letters*, 228(3-4): 525-546
- Xu L L, Bi X W, Hu R Z, Tang Y Y, Wang X S, Xu Y. 2015. LA-ICP-MS mineral chemistry of titanite and the geological implications for exploration of porphyry Cu deposits in the Jinshajiang-Red River alkaline igneous belt, SW China. *Mineralogy and Petrology*, 109(2): 181-200
- Xu Y G, Chung S L, Jahn B M, Wu G Y. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China. *Lithos*, 58(3-4): 145-168
- Qi L, Gregoire D C. 2000. Determination of trace elements in twenty six Chinese geochemistry reference materials by inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 24(1): 51-63
- 陈小明, 潘燕宁, 浦玉忠. 1999. 海底玄武岩的基质矿物研究. *地质论评*, 45(增刊): 108-112
- 陈毓川, 王瑞江. 2019. 从三稀资源调查扩大到关键矿产调查是战略性新兴产业发展的必然需要: 推荐阅读《地质学报》"关键矿产"专辑. *地质论评*, 65(4): 915-916
- 杜胜江, 温汉捷, 罗重光, 顾汉念, 于文修, 李阳, 孟勇, 杨季华. 2019. 滇东-黔西地区峨眉山玄武岩富 Nb 榍石矿物学特征. *矿物学报*, 39(3): 253-263
- 黄训华. 1997. 威宁鹿房稀土矿地质特征及成矿作用初步分析. *贵州地质*, 14(4): 328-333
- 蒋少涌, 温汉捷, 许成, 王焰, 苏慧敏, 孙卫东. 2019. 关键金属元素的多圈层循环与富集机理: 主要科学问题及未来研究方向. *中国科学基金*, 33(2): 112-118
- 刘廷良, 魏复盛, 滕恩江. 1992. 玄武岩和花岗岩及其发育土壤中稀土元素背景值特点. *中国环境监测*, 8(3): 18-20
- 王登红. 2019. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向. *地质学报*, 93(6): 1189-1209
- 王伟, 杨瑞东, 栾进华, 黄波. 2011. 贵州西部玄武岩风化壳中稀土矿成矿机理及成矿模式. *四川地质学报*, 31(4): 420-423
- 徐义刚, 梅厚钧, 许继峰, 黄小龙, 王岳军, 钟孙霖. 2003. 峨眉山大火成岩省中两类岩浆分异趋势及其成因. *科学通报*, 48(4): 383-387
- 徐义刚, 何斌, 黄小龙, 罗震宇, 朱丹, 马金龙, 邵辉. 2007. 地幔柱大辩论及如何验证地幔柱假说. *地学前缘*, 14(2): 1-9
- 徐义刚, 何斌, 罗震宇, 刘海泉. 2013. 我国大火成岩省和地幔柱研究进展与展望. *矿物岩石地球化学通报*, 32(1): 25-39
- 杨瑞东, 王伟, 鲍森, 王强, 魏怀瑞. 2006. 贵州赫章二叠系玄武岩顶部稀土矿床地球化学特征. *矿床地质*, 25(增刊): 205-208
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 蒋少涌, 李文昌, 王汝成, 王登红, 齐涛, 秦克章, 温汉捷. 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题. *中国科学基金*, 33(2): 106-111
- 张云湘, 骆耀南, 杨崇喜. 1988. 攀西裂谷. 北京: 地质出版社
- 张正伟, 杨晓勇, 温汉捷. 2010. 贵州黔西地区上二叠统宣威组发现富镓矿化层. *矿物岩石地球化学通报*, 29(1): 107-108
- 赵平, 李爱民, 李松涛, 杨成富, 赵富远, 严春杰, 王泽鹏, 陈菊, 杨刚. 2019. 黔西北玄武岩风化壳稀土地球化学特征. *矿物学报*, 39(4): 464-473

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 张兴春)