

海南岛晚古生代洋岛玄武岩(OIB型)的发现及地球动力学暗示*

王智琳^{1,2} 许德如^{1**} 吴传军^{1,2} 付王伟^{1,2} 王力^{1,2} 吴俊^{1,2}

WANG ZhiLin^{1,2}, XU DeRu^{1**}, WU ChuanJun^{1,2}, FU WangWei^{1,2}, WANG Li^{1,2} and WU Jun^{1,2}

1. 中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

1. CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2011-07-05 收稿, 2012-03-07 改回.

Wang ZL, Xu DR, Wu CJ, Fu WW, Wang L and Wu J. 2013. Discovery of the Late Paleozoic ocean island basalts (OIB) in Hainan Island and their geodynamic implications. Acta Petrologica Sinica, 29(3): 875–886

Abstract A suite of metamorphic mafic-ultramafic lavas outcrop in Junying-Bangxi area, Hainan Island, South China. Based on the geological, petrological, mineralogical and geochemical results, the Junying-Bangxi metamorphic mafic-ultramafic lavas can be classified into two major magma types, namely, the high-Mg and the low-Mg types, in which the former is high in Mg ($Mg^{\#} = 76.9 \sim 81.3$), whereas the latter is high in TiO_2 (2.34% ~ 3.27%) but low in Mg ($Mg^{\#} = 40.7 \sim 48.4$). The chondrite-normalized REE patterns of this suite of rocks appear LREE-riched type ($(La/Yb)_N = 2.40 \sim 7.58$) with no apparently Eu anomaly. Primitive mantle-normalized trace element patterns show no Nb depletion and slightly Ta positive anomaly. The $^{87}Sr/^{86}Sr$ (270Ma) and ϵ_{Nd} (270Ma) values range from 0.70645 to 0.70956 and from +4.7 to +6.5, respectively. These geochemical characteristics are similar to that of ocean island basalt (OIB). Some trace element ratios characterizing the source regions, such as Ta/Hf, Th/Nb, Nb/Zr, La/Ta, La/Sm, $(La/Nb)_{PM}$, and $(Th/Ta)_{PM}$, reveal that the Junying-Bangxi lavas have affinity to OIB from intraplate magmatism associated with mantle plume activity. Electron microprobe analyses on olivine phenocrysts in the Junying-Bangxi ultramafic lavas further indicate that the high-Mg nature is caused by olivine accumulation. Combined with the low Fo (68 ~ 77) of olivine phenocrysts, we propose that the primary magma likely is low-Mg basaltic magma which have derived from the low degree partial melting of garnet lherzolite mantle. The lower contents in Cr and Ni for low-Mg type, relative to that for the high-Mg type, indicate fractional crystallization of olivine and clinopyroxene occurs subsequently. The Late Paleozoic OIB-type lavas in Junying-Bangxi area probably were produced in an extensional back-arc basin, owing to the subduction of Paleo-Tethys Ocean and the probably synchronous initiation of the mantle plume under South China continental margin. This suite of metamorphic mafic-ultramafic lavas, as new evidence, is significant for discussing the evolution of South China Eastern Paleo-Tethyan Ocean.

Key words Mafic-ultramafic lavas; Paleo-Tethys; OIB-type basalts; Junying-Bangxi area in Hainan Island

摘要 海南岛西部的军营-邦溪地区产出一套变质的、晚古生代镁铁质-超镁铁质熔岩系列。根据地质学、岩石学、矿物学和地球化学研究,该套岩石可划分为高镁和低镁两个系列,前者以高镁($Mg^{\#} = 76.9 \sim 81.3$)为特征,后者以低镁($Mg^{\#} = 40.7 \sim 48.4$)、高钛含量(2.34% ~ 3.27%)为特征。这套镁铁质-超镁铁质熔岩具有LREE富集 [$(La/Yb)_N = 2.40 \sim 7.58$]和无明显Eu异常的稀土配分模式,以及无Nb亏损、但略具轻微Ta正异常的微量元素原始地幔标准化曲线; $^{87}Sr/^{86}Sr$ (270Ma)和 ϵ_{Nd} (270Ma)比值的变化范围分别为0.70645 ~ 0.70956和+4.7 ~ +6.5,这些地球化学特征与洋岛玄武岩(OIB)极其相似。一些反映源区特征的比值,如Ta/Hf、Th/Nb、Nb/Zr、La/Ta、La/Sm、 $(La/Nb)_{PM}$ 、 $(Th/Ta)_{PM}$ 等均指示其地幔柱成因,是石榴子石二辉橄榄岩地幔低程度部分熔融形成的产物。橄榄石斑晶的矿物化学进一步揭示,岩石的高镁性质是由橄榄石堆晶引起的,而橄

* 本文受国家重点基础研究发展计划973项目(2012CB416806)和国家自然科学基金(40473017,40773017)联合资助。

第一作者简介:王智琳,女,1984年生,博士生,矿床学专业,E-mail: wangzhilin1025@163.com

** 通讯作者:许德如,男,1966年生,博士、研究员,从事于大陆边缘构造与成矿学研究,E-mail: xuderu@gig.ac.cn

榄石斑晶低的 Fo(68~77) 值,暗示其原始岩浆为低镁的玄武质岩浆;低镁系列相对于高镁系列明显低的 Cr、Ni 含量,说明岩浆随后发生了橄榄石和单斜辉石的分离结晶作用。军营-邦溪地区晚古生代 OIB 型洋岛玄武岩可能代表了东古特提斯洋在海南岛的又一记录,该认识对深入探讨华南古特提斯洋的演化及其在海南岛的响应提供了新的证据。

关键词 镁铁质-超镁铁质熔岩;古特提斯洋;洋岛玄武岩;海南岛军营-邦溪地区

中图法分类号 P588.145

沿海南岛东西向昌江-琼海断裂带两侧的军营-邦溪和屯昌晨星等地区产出一系列变质的镁铁质-超镁铁质熔岩,这些岩石呈透镜状、扁豆状、似层状或不规则团块状夹于古生代海相-浅海相浅变质碎屑沉积地层中。近二十年来,国内许多学者曾围绕它们的形成时代、岩石成因及产出环境、源区特征和代表的地球动力学事件等开展了多方面的研究:或认为它们是晚古生代双峰式火山岩系,代表了一个陆内裂谷的构造背景(Fang *et al.*, 1992;夏邦栋等, 1991);或是玄武质科马提岩类,代表了元古宙时期板片俯冲和/或古陆壳裂解的构造环境(梁新权等, 2000;张业明等, 1998;许德如等, 2001);或认为是洋中脊型玄武岩,代表东古特提斯洋壳的残片(Li *et al.*, 2002;李献华等, 2000)。许德如等(2006)、Xu *et al.* (2007, 2008) 则认为屯昌晨星地区镁铁质熔岩可能代表了~450Ma 的早古生代时期洋壳形迹,而军营-邦溪地区

镁铁质熔岩更可能记录了~270Ma 的晚古生代时期东古特提斯洋向华南大陆边缘俯冲导致的弧后扩张事件。可见,有关这些岩石的成因、形成时代及所代表的构造环境和地球动力学背景仍存在着显著分歧;而以往研究又多侧重于其中的镁铁质熔岩,对超镁铁质熔岩,特别是其中的高镁岩石成因尚未展开深入的工作。本文主要依据最新获得的主量、微量元素和 Sr-Nd 同位素地球化学数据,并结合 Xu *et al.* (2007) 已发表的本区样品的锆石年龄,对军营-邦溪地区镁铁质-超镁铁质熔岩的岩石成因及其大地构造环境进行分析,以期为进一步揭示古生代以来海南岛地球动力学演化事件提供新的制约。

1 地质背景及野外描述

海南岛是我国南海海域中最大的陆缘岛,位于华南板

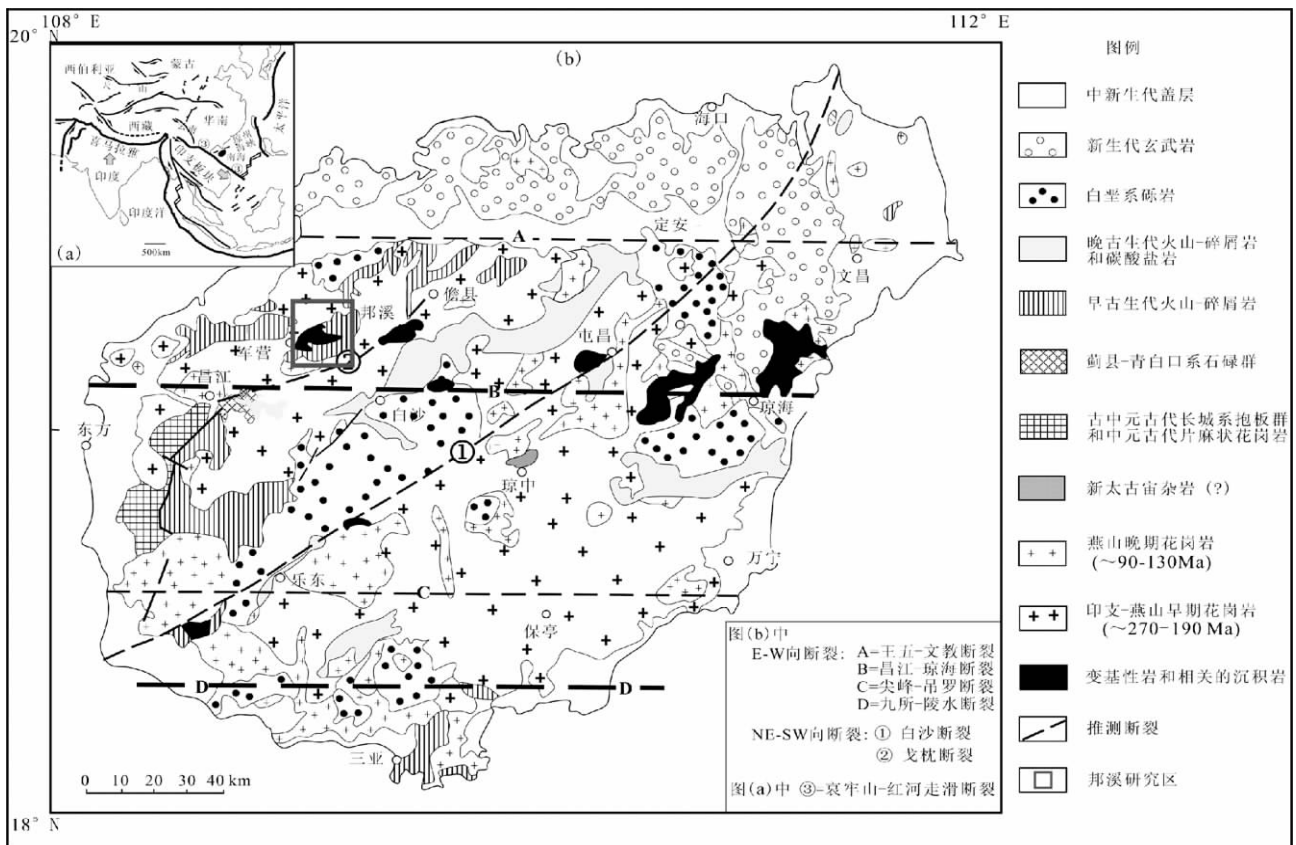


图1 海南岛主要构造、地层和岩浆岩分布地质简图(据许德如等, 2007 修改)

Fig.1 Simplified geological map of Hainan Island showing the main tectono-stratigraphic and tectono-magmatic units (modified after Xu *et al.*, 2007)

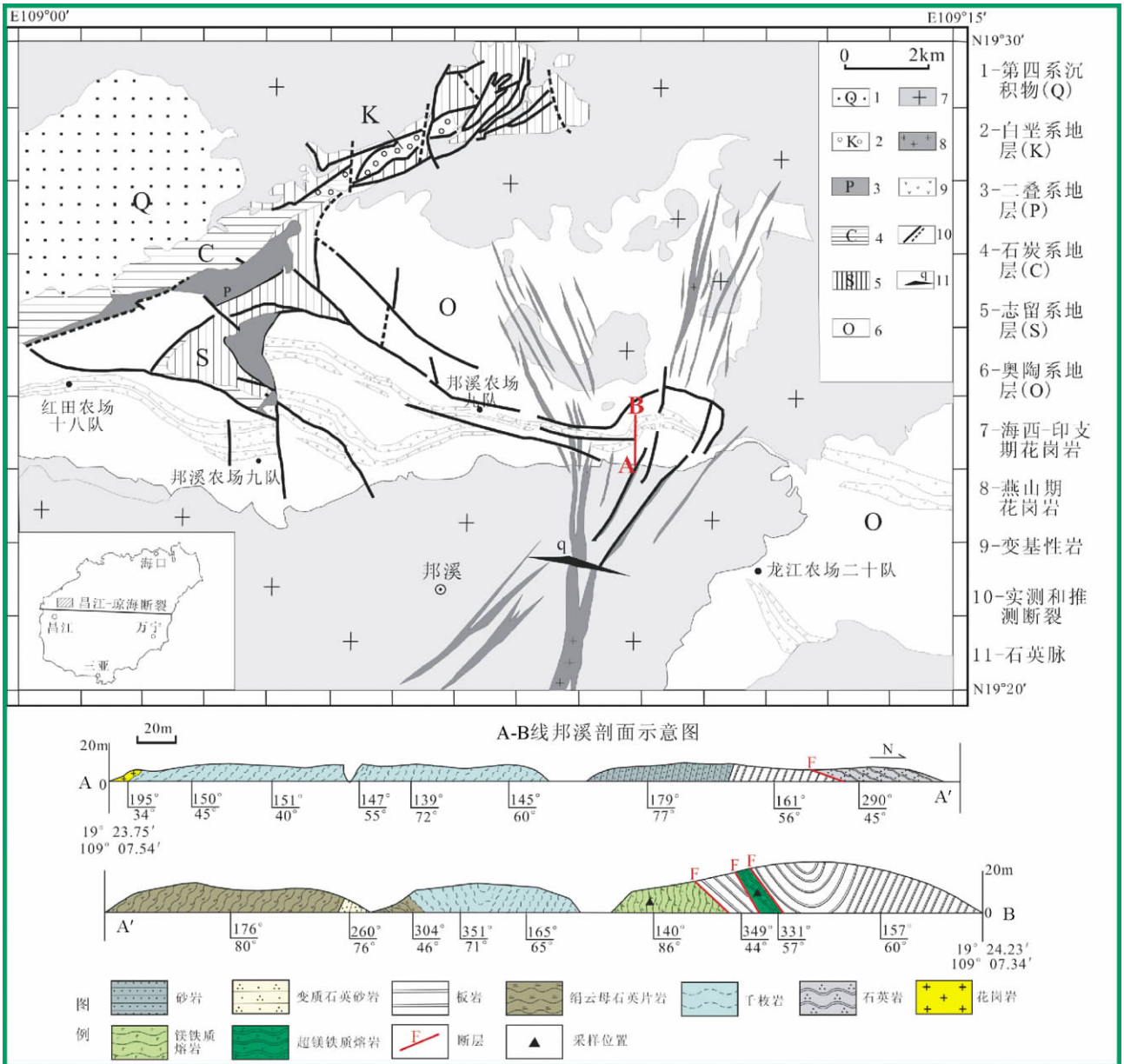


图2 海南岛西部军营-邦溪地区区域地质图及A-B段镁铁质-超镁铁质熔岩的实测剖面图(据许德如等,2007修改)

Fig.2 Sketch map showing regional geology of the Junying-Bangxi area in the western Hainan Island and measured cross section A-B of mafic-ultramafic lavas (modified after Xu *et al.*, 2007)

块、印支板块和澳大利亚板块的交汇部位,以琼州海峡与华南内陆相连。海南岛特殊的大地构造位置使其既受特提斯构造域的影响,又受滨太平洋构造域的控制,因而表现出多期次强烈的构造运动、岩浆作用和变质作用等特征。海南岛主要构造线呈近东西向和北东向,其次为北西向(图1)。其中,近东西向构造自北而南以王五-文教、昌江-琼海、尖峰-吊罗和九所-陵水等断裂带为代表。出露于该岛的主要地层为古生界,其次是元古宇及中生界,新太古宙或更古老的基底可能存在于岛内琼中和三亚地区(张业明等,1997)。海西-印支期(300~240Ma)及燕山期花岗岩(130~90Ma)则是

岛内主要岩浆类型(Li *et al.*, 2006; 李孙雄等, 2005), 出露面积约占全岛的60%。不同时代的喷出岩在本岛均有出现, 占全岛面积的13%, 其中又以中、新生代为主, 主要分布于琼北和岛南地区(图1)。

军营-邦溪地区位于海南岛昌江-琼海断裂带西侧, 出露于该区的地层有奥陶系、志留系、二叠系、白垩系和第四系(图2), 但因多期花岗岩的侵入被肢解或破坏。其中, 奥陶系南碧沟组为一套浅变质碎屑岩, 岩性以千枚岩、绢云板岩为主, 夹变质粉砂岩、细砂岩、碳质板岩, 并与变质的镁铁质-超镁铁质熔岩呈层状、似层状或断层接触(许德如等,

2007)。这些岩石普遍遭受了区域变质作用和强烈的构造叠加变形,各种面理构造发育。野外地质剖面实测发现(图2) 军营-邦溪地区变质的镁铁质-超镁铁质熔岩主要呈透镜状夹于奥陶系南碧沟组中,与围岩呈断层接触,部分片理产状与围岩构造面理基本一致。不过,由于强烈的构造置换和植被发育,目前的野外调查还无法建立该套镁铁质-超镁铁质岩的原始堆积层序和彼此接触关系。

2 岩相学及矿物学特征

军营-邦溪地区镁铁质-超镁铁质熔岩已发生了绿片岩相-角闪岩相的变质作用,岩石多呈墨绿色-黑色,斑状结构,块状构造,局部具片理化。岩相学和电子探针分析结果(图3和表1)表明:超镁铁质熔岩中斑晶主要为橄榄石,属富镁端元的贵橄榄石和透铁橄榄石($Fo = 68 \sim 77$) (表1),主要呈板状或粒状集合体,顺橄榄石斑晶的边部及裂理(或裂隙)多有绿泥石化、阳起石化和透闪石化发生,使得橄榄石呈不规则状或被交代呈碎裂状,甚至形成橄榄石假象(图3a-c),此外,橄榄石中还存在因蚀变而析出的它形磁铁矿;基质多已脱玻化并蚀变为细小的片状透闪石、阳起石和绿泥石。镁铁质熔岩的斑晶为单斜辉石(主要为钙铁辉石,少量透辉石),基质为绿色的镁角闪石-镁钙闪石、斜长石(主要为更长石,牌号 $[An/(An+2Ab)] = 24 \sim 29$)。副矿物为磁铁矿、钛铁矿、磷灰石和榍石等(图3d),斜长石具不同程度的绢云母化和土化。

3 元素地球化学和同位素组成分析方法

本文对采自军营-邦溪地区的12个变质的镁铁质-超镁铁质熔岩样品分别进行了主量元素、微量元素和Sr-Nd同位素测定。分析测试均在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室完成。主量、微量元素和Sr-Nd同位素测定采用的分析方法分别为X射线荧光光谱分析(XRF)、电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)和多接收器电感耦合等离子体质谱(MC-ICPMS),XRF分析精度优于5%,ICP-MS分析方法见刘颖等(1996),分析精度优于3%。Sr-Nd同位素分析方法及实验流程见韦刚健等(2002)和梁细荣等(2002)。

4 地球化学特征

4.1 主量元素

主量元素分析结果见表2。超镁铁质熔岩(含橄榄石斑晶)的样品MgO含量均超过了20%,甚至接近30%,具有异常高镁的特征,而镁铁质熔岩(含辉石斑晶)的样品MgO含量小于6%,故将这套超镁铁质-镁铁质熔岩分为两个系列:高镁系列和低镁系列。它们在主量元素特征上存在着显著

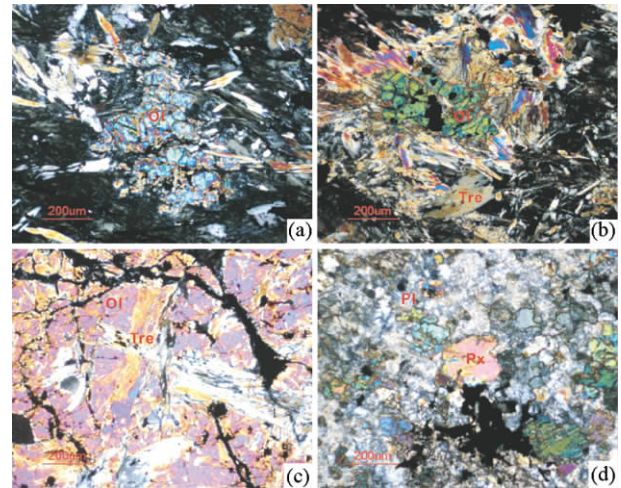


图3 海南岛西部军营-邦溪地区变质的镁铁质-超镁铁质熔岩的正交偏光显微照片

(a) 板状橄榄石斑晶(Ol)及透闪石和绿泥石化的基质;(b) 片状透闪石(Tre)沿着橄榄石斑晶集合体的边部进行交代;(c) 橄榄石斑晶内部被十字交叉片状透闪石交代;(d) 辉石(Px)斑晶和基质中的细小斜长石(Pl)

Fig. 3 Photomicrograph of metamorphic mafic-ultramafic lavas in Junying-Bangxi area of the west of Hainan Island (a) tabular olivine phenocrysts and matrix with tremolitization and chloritization; (b) flake tremolite replace along the margin of olivine phenocrysts aggregate (c) criss-crossing flake tremolite in the inner of olivine phenocrysts; (d) pyroxene phenocrysts and fine plagioclase in matrix

的差异:高镁系列中 SiO_2 含量为42.41%~45.48%、MgO为21.79%~31.38%、 Al_2O_3 为5.67%~8.81%、 TiO_2 为0.78%~1.13%,相对于低镁系列,总体上具有高的MgO含量($Mg^\# = 76.9 \sim 81.3$),以及低的 Al_2O_3 、CaO、 SiO_2 和 TiO_2 含量。低镁系列 SiO_2 含量平均为49%,MgO为4.29%~5.42%,但具有高碱($K_2O + Na_2O = 4.88\% \sim 5.12\%$)、且 Na_2O 远大于 K_2O 和富钛($TiO_2 > 2\%$)的特征,尤其是样品05BX-02,其 TiO_2 含量(3.27%)与洋岛玄武岩OIB相应值一致。而超镁铁质熔岩相对于镁铁质熔岩低的 TiO_2 可能是橄榄石堆晶的结果。在 $Zr/TiO_2 \times 0.0001 - Nb/Y$ 图解中(图4),高镁系列落在亚碱性玄武岩区域,低镁系列落在碱性玄武岩范围内。

4.2 微量元素

微量元素方面(表2),高镁系列相对于低镁系列,具有低的不相容微量元素浓度和高的Cr($2267 \times 10^{-6} \sim 2705 \times 10^{-6}$)、Ni($1027 \times 10^{-6} \sim 1113 \times 10^{-6}$)含量,可能与岩浆早期发生的橄榄石-单斜辉石分离结晶作用有关,而高的Cr和Ni含量可能是由堆晶引起的。 ΣREE 基本上随MgO含量的增高而降低,高镁系列的稀土元素总量为 $27.0 \times 10^{-6} \sim 46.2 \times$

表1 超镁铁质熔岩中的橄榄石斑晶电子探针分析结果(wt%)

Table 1 Electron microprobe analysis for olivine phenocrysts in ultramafic lavas (wt%)

点号	样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	NiO	Total	Fo
1-c		36.75	-	0.02	28.34	0.29	33.71	-	0.02	-	0.19	99.32	68
2-m		37.28	-	0.00	28.82	0.15	34.60	-	0.05	0.01	0.13	101.05	68
6-m		36.35	-	-	29.12	0.23	34.24	0.01	0.07	0.02	0.21	100.25	68
8-m		37.05	0.01	-	28.16	0.30	33.91	0.01	0.01	0.01	0.18	99.64	68
3-r		37.24	0.05	-	5	0.33	34.49	0.01	0.02	0.03	0.19	100.00	69
7-r		39.26	0.03	0.02	26.00	0.22	34.88	0.02	0.02	0.04	0.18	100.66	71
9-r		36.37	0.05	-	27.71	0.28	34.73	0.02	0.01	0.02	0.16	99.34	69
16-c		36.87	0.03	-	27.04	0.30	35.22	0.00	0.02	0.02	0.21	99.72	70
17-m		37.58	-	-	27.43	0.27	35.30	-	0.05	0.01	0.18	100.81	70
19-m		37.01	0.06	-	26.47	0.24	35.22	0.01	-	-	0.18	99.19	70
22-m		36.60	0.06	0.01	27.72	0.29	35.29	0.00	0.05	0.02	0.21	100.25	69
24-m		37.24	0.06	-	27.04	0.29	35.28	0.01	-	0.01	0.18	100.09	70
18-r		37.19	0.02	-	27.44	0.32	35.19	-	0.07	-	0.21	100.44	70
20-r	05BX-04-1	36.84	-	-	26.73	0.23	35.12	0.01	-	0.01	0.18	99.10	70
21-r		36.19	0.06	0.01	26.95	0.32	34.73	0.01	0.04	0.02	0.13	98.46	70
23-r		36.91	-	-	27.85	0.33	35.25	-	-	0.01	0.16	100.51	69
30-c		36.61	0.13	-	27.82	0.20	34.77	-	0.05	0.01	0.13	99.71	69
31-r		36.98	0.08	0.02	28.46	0.29	34.78	-	0.02	0.01	0.20	100.84	69
32-r		37.53	0.10	0.00	26.67	0.27	35.11	-	0.05	-	0.25	99.98	70
33-r		36.76	0.08	-	27.83	0.26	34.96	-	0.06	-	0.22	100.16	69
38-c		37.00	0.04	-	28.68	0.27	34.43	-	0.01	-	0.19	100.61	68
39-m		36.63	0.06	0.02	27.59	0.31	34.33	-	0.01	0.01	0.17	99.11	69
40-r		35.56	-	-	26.09	0.29	33.27	0.02	0.07	0.04	0.17	95.50	69
42-c		37.20	0.05	0.01	27.63	0.23	35.38	-	-	0.00	0.19	100.69	70
43-m		36.80	-	-	28.09	0.36	35.53	-	-	0.01	0.15	100.95	69
44-r		37.44	0.04	-	27.52	0.31	35.34	0.02	-	-	0.19	100.86	70
53-c		36.54	0.13	0.01	28.28	0.37	34.74	0.00	0.02	0.01	0.17	100.27	69
54-r		36.77	0.02	0.01	27.60	0.39	34.87	-	0.02	0.01	0.10	99.79	69
1-c	05BX-04-2	37.35	-	-	23.79	0.39	39.13	-	0.08	0.01	0.24	100.98	75
5-r		37.51	0.01	-	23.22	0.40	38.48	0.00	0.05	0.02	0.21	99.89	75
2-c	05BX-04-4	37.79	0.03	-	22.69	0.30	38.33	0.02	0.06	0.04	0.19	99.43	75
3-r		37.90	-	-	23.70	0.32	38.28	-	-	0.04	0.21	100.45	74
11-c	BX-1	37.66	0.08	-	23.92	0.43	38.18	-	-	0.02	0.19	100.47	74
12-r		37.78	0.09	0.01	23.36	0.52	37.18	0.03	0.10	0.05	0.18	99.30	74
13-r		37.77	-	-	22.72	0.43	38.24	-	-	0.01	0.15	99.31	75
3-c		37.37	0.11	-	22.67	0.44	38.29	0.01	0.03	-	0.19	99.10	75
2-r		37.96	0.06	0.02	23.30	0.48	38.06	0.03	0.03	0.01	0.24	100.18	74
4-r		38.08	-	0.01	23.35	0.38	37.93	-	-	0.03	0.13	99.91	74
3-c	BX-4	38.42	-	0.00	21.90	0.45	38.27	0.02	0.04	0.01	0.20	99.30	76
4-r		36.69	0.02	0.01	22.23	0.42	41.22	0.02	-	0.01	0.22	100.84	77
9-c		40.35	0.01	0.11	21.97	0.36	36.58	1.16	0.08	0.01	0.20	100.81	75
8-r		33.26	0.02	0.01	23.82	0.37	35.34	0.02	-	0.01	0.20	93.05	73
1-c	BX-5	43.52	-	0.02	20.07	0.50	34.52	0.16	0.00	0.02	0.13	98.95	75
2-m		37.43	-	-	23.32	0.46	38.12	0.00	-	0.01	0.18	99.52	74
3-m		35.96	-	0.00	23.37	0.40	39.49	-	-	-	0.23	99.45	75
4-r		38.69	0.11	-	22.17	0.44	39.10	-	0.00	0.01	0.22	100.73	76
5-r		38.32	-	-	22.50	0.42	38.53	-	-	0.01	0.25	100.03	75
15-c		38.53	-	-	22.36	0.42	39.15	-	0.03	-	0.24	100.72	76
16-r		38.01	-	0.00	23.43	0.50	38.36	-	0.03	-	0.18	100.51	74
5-c		38.14	-	0.00	23.72	0.51	37.35	0.03	0.04	0.02	0.16	99.97	74
6-m	BX-6	38.03	-	-	23.15	0.42	38.25	0.01	0.03	0.01	0.22	100.11	75
7-r		37.51	-	-	23.78	0.56	37.85	0.05	0.02	0.02	0.21	100.00	74

注 “c”-核部 “m”-幔部 “r”-边部 “-”表示低于检测限. 电子探针分析单位: 中国科学院广州地球化学研究所电子探针分析室, 所用仪器型号为 JOEL JXA8100 型, 测试条件: 加速电压 15kV; 探针电流 20nA; 束斑直径: 1 μ m ZAF 修正法, 标样采用美国 SPI 公司的硅酸盐矿物和氧化物标样

表2 海南军营-邦溪地区变质的镁铁质-超镁铁质熔岩的主量元素(wt%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 2 Major element (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) analysis for mafic-ultramafic lavas in Junying-Bangxi area of Hainan Island

样品号	BX-1	BX-2	BX-3	BX-4	BX-5	BX-6	05BX-04-01	05BX-04-02	05BX-04-03	05BX-04-04	05BX-01	05BX-02
岩石系列	高镁系列						低镁系列					
SiO ₂	43	42.41	43.89	43.17	42.48	42.91	44.23	44.96	45.48	43.59	48.88	48.79
TiO ₂	0.79	0.86	0.84	0.87	0.87	0.87	0.86	0.78	1.13	0.81	2.34	3.27
Al ₂ O ₃	6.45	6.44	6.59	6.71	6.5	6.89	6.64	5.67	8.81	5.98	17.18	16.08
Fe ₂ O ₃ ^T	14.71	16.55	14.25	14.43	15.27	16.15	14.59	15.83	12.76	14.31	11.44	12.4
MnO	0.19	0.19	0.18	0.2	0.2	0.17	0.19	0.17	0.16	0.19	0.2	0.19
MgO	29.4	28.64	29.04	29.51	29.35	27.18	29.42	27.2	21.79	31.38	5.42	4.29
CaO	5.38	4.85	5.11	5.09	5.26	5.79	3.77	5.23	9.21	3.77	9.46	9.97
Na ₂ O	0.09	0.08	0.08	0.08	0.1	0.1	0.05	0.06	0.43	0	4.38	4.48
K ₂ O	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	0.02	0.74	0.4
P ₂ O ₅	0.1	0.11	0.1	0.09	0.12	0.1	0.11	0.12	0.15	0.1	0.55	0.76
Total	100.14	100.16	100.1	100.17	100.15	100.17	99.89	100.04	99.97	100.15	100.59	100.62
LOI	5.68	5.06	5.31	5.86	5.5	5.77	4.24	5.26	4.04	5.93	1.1	1.02
Mg [#]	79.8	77.4	80.2	80.2	79.2	76.9	80.0	77.3	77.2	81.3	48.4	40.7
Sc	16.09	17.2	17	17.72	17.26	18.41	16.12	16.65	21.48	17.7	24.95	37.75
Ti	4223	4487	4499	4599	4461	4922	4148	5078	6277	4163	14406	20217
V	127	153	118	129	139	132	129	138	150	117	225	286
Cr	2316	2441	2424	2578	2464	2705	2267	2407	1396	2371	129	40.7
Mn	1356	1399	1346	1483	1500	1273	1247	1373	1255	1325	1678	1486
Co	105.7	110.1	96.45	103.6	104.6	91.93	114.6	104	76.97	106.6	32.25	32.77
Ni	1027	1063	1043	1056	1059	1057	1053	1093	668	1113	55.62	19.25
Cu	42.68	58.65	33.65	43.39	66.25	61.28	53.51	40.14	31.09	33.71	13.94	130
Zn	90.77	95.85	91.12	95.44	106	104	83.26	95.45	81.11	83.9	131	129
Ga	7.45	8.01	7.36	8.11	8.06	8.15	7.48	7.81	9.84	6.88	22.07	21.02
Ge	1.04	1	0.97	1.04	1	1.05	1.06	1.03	1.26	1.1	1.56	1.36
Rb	2.17	2.47	1.91	2.59	2.01	1.14	2.18	3.87	0.37	1.86	29.29	16.62
Sr	188	192	185	186	197	209	110	149	21.3	105	881	831
Y	11.26	10.99	11.34	11.07	11.36	13.58	9.94	9.72	17.27	10.33	35.23	46.95
Zr	58.72	61.86	58.16	67.62	64.18	65.04	46.15	55.31	82.23	47.54	255	305
Nb	3.65	3.81	3.87	3.94	3.83	4.2	3.59	4.4	4.86	3.07	37.39	44.01
Cs	3.55	4.22	3.08	4.11	3.38	1.75	3.29	5.92	0.21	3.61	1.8	0.7
Ba	116	158	191	133	96.6	50.7	41.9	114	5.83	14.7	626	405
Hf	1.3	1.4	1.33	1.48	1.46	1.5	1.03	1.21	1.82	1.11	5.66	6.85
Ta	0.27	0.28	0.27	0.29	0.28	0.31	0.25	0.31	0.34	0.23	2.66	3.16
Pb	0.72	0.7	0.51	0.567	1.71	0.89	0.66	0.46	0.81	0.57	3.23	4.04
Th	0.36	0.42	0.38	0.39	0.41	0.44	0.38	0.37	0.44	0.29	3.4	3.95
U	0.09	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.1	0.09	0.86	0.95
La	3.89	5.64	5.23	3.56	5.04	7.09	4.75	3.89	5.94	3.46	31.89	33.9
Ce	9.12	12.47	11.63	8.69	11.63	15.41	10.98	8.93	14.58	8.36	66.64	81.1
Pr	1.3	1.65	1.56	1.24	1.53	1.96	1.47	1.25	2.06	1.22	8.72	10.31
Nd	6.04	7.08	6.83	5.85	6.91	8.38	6.47	5.72	9.31	5.6	35.06	43.34
Sm	1.6	1.64	1.64	1.56	1.69	1.89	1.56	1.4	2.46	1.39	7.21	9.4
Eu	0.65	0.59	0.68	0.62	0.66	0.77	0.51	0.5	0.8	0.54	2.28	3.11
Gd	1.88	1.85	1.93	1.84	1.98	2.23	1.75	1.64	2.84	1.66	7.1	9.42
Tb	0.33	0.31	0.33	0.32	0.33	0.37	0.28	0.29	0.5	0.29	1.13	1.48
Dy	2	1.91	1.94	1.93	2.01	2.23	1.79	1.75	3.15	1.8	6.44	8.52
Ho	0.41	0.41	0.42	0.42	0.42	0.48	0.37	0.35	0.67	0.38	1.28	1.67
Er	1.12	1.08	1.1	1.15	1.16	1.27	0.99	0.99	1.81	1.05	3.4	4.37
Tm	0.16	0.17	0.17	0.17	0.17	0.19	0.15	0.14	0.26	0.15	0.49	0.64
Yb	1.02	1.01	1.01	1.07	1.07	1.13	0.89	0.9	1.59	0.97	3.02	3.81
Lu	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.19	0.14	0.14	0.24	0.15	0.47	0.59
ΣREE	29.8	36	34.6	28.6	34.8	43.6	32.1	27.9	46.2	27	175.1	211.7

注:表中氧化物含量为去掉烧失量后重新计算的数据; Mg[#] = Mg / (Mg + Fe) × 100

表3 海南军营-邦溪地区变质的镁铁质-超镁铁质熔岩的 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 3 Sr and Nd isotope analysis for the metamorphic mafic-ultramafic lava in Junying-Bangxi area

样品号	Rb(× 10 ⁻⁶)	Sr(× 10 ⁻⁶)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr ± 2σ	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(t)	Sm(× 10 ⁻⁶)	Nd(× 10 ⁻⁶)	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd ± 2σ	ε _{Nd} (t)
05BX-02	16.62	830.9	0.70977 ± 15	0.70956	9.4	43.34	0.51276 ± 14	4.7
05BX-04-1	2.18	110.4	0.70705 ± 20	0.70683	1.56	6.47	0.51285 ± 14	5.9
05BX-04-2	3.87	149.4	0.70699 ± 21	0.70671	1.4	5.72	0.51288 ± 11	6.5
05BX-04-3	0.37	21.32	0.70663 ± 24	0.70645	2.46	9.31	0.51286 ± 13	5.6
05BX-04-4	1.86	104.5	0.70734 ± 26	0.70715	1.39	5.60	0.51288 ± 10	6.4
BX-01	2.17	187.8	0.70693 ± 24	0.70681	1.60	6.04	0.51283 ± 16	5.1
BX-02	2.47	192.4	0.70687 ± 15	0.70673	1.635	7.08	0.51280 ± 15	5.2
BX-03	1.91	185.3	0.70685 ± 15	0.70674	1.64	6.83	0.51271 ± 12	3.2
BX-04	2.59	185.9	0.70714 ± 25	0.70699	1.56	5.85	0.51284 ± 13	5.2
BX-05	2.01	196.8	0.70681 ± 22	0.70670	1.69	6.91	0.51281 ± 13	5.0
BX-06	1.14	209.1	0.70667 ± 21	0.70661	1.89	8.39	0.51284 ± 13	6.0

注: 计算采用的参数: λ_{Rb} = 1.42 × 10⁻¹¹ /a, λ_{Sm} = 6.54 × 10⁻¹² /a, t = 270Ma, 球粒陨石现今同位素比值 (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} = 0.512638, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} = 0.1967, 地球均一储库现今比值 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_{U.R} = 0.7045, (⁸⁷Rb/⁸⁶Sr)_{U.R} = 0.0827

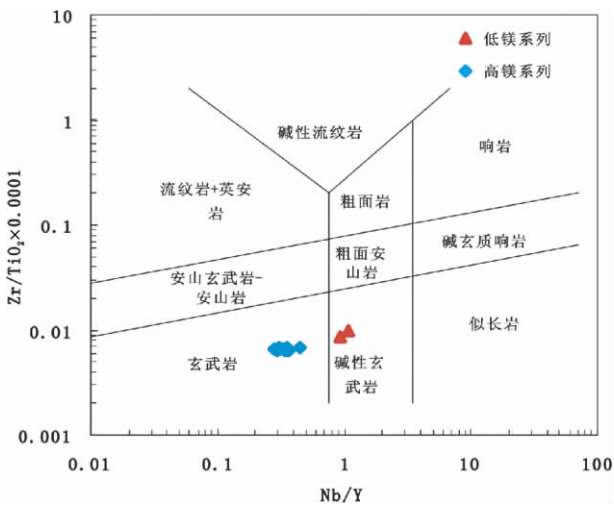


图4 海南岛军营-邦溪地区变质的镁铁质-超镁铁质熔岩的 Zr/TiO₂ × 0.0001-Nb/Y 图解

Fig. 4 Zr/TiO₂ versus Nb/Y diagram for classification of the Junying-Bangxi mafic-ultramafic lavas

10⁻⁶ 而低镁系列的稀土元素总量为 175.1 × 10⁻⁶ ~ 211.7 × 10⁻⁶ (表2)。球粒陨石标准化的稀土配分曲线(图5)表明, 军营-邦溪地区样品的稀土配分形式为轻稀土富集型, 重稀土呈略向右倾-平坦型, 但样品间存在一定的差异性, 其中, 高镁系列呈轻稀土略富集型, La 的丰度大约是球粒陨石的 20 倍, 轻重稀土分异较弱, (La/Yb)_N = 2.40 ~ 4.15; 低镁系列显示出轻稀土的强富集型, La 的丰度约是球粒陨石的 140 倍, (La/Yb)_N 比值为 6.39 ~ 7.58, 轻重稀土分异明显。样品 δEu 值范围为 0.93 ~ 1.16, 无明显的 Eu 的异常, 表明在岩浆形成和演化过程中几乎不存在斜长石的分异结晶作用。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图中(图6), 高镁系列和低镁系列总体上变化趋势相似, 均呈现出大离子亲石元素和高场强元素、特别是大离子亲石元素的富集。不存在 Nb、Ta 的

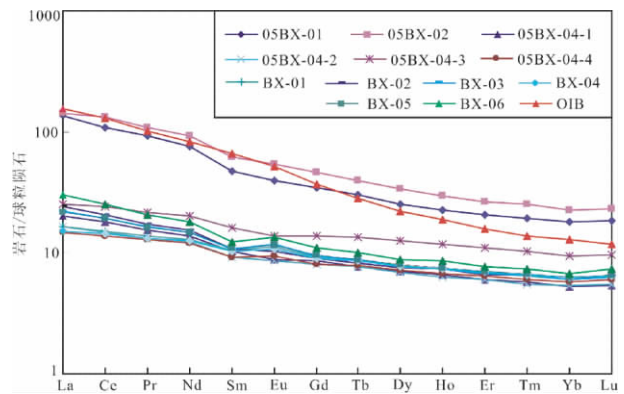


图5 球粒陨石标准化 REE 配分模式图 (球粒陨石和 OIB 数据引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (after Sun and McDonough, 1989)

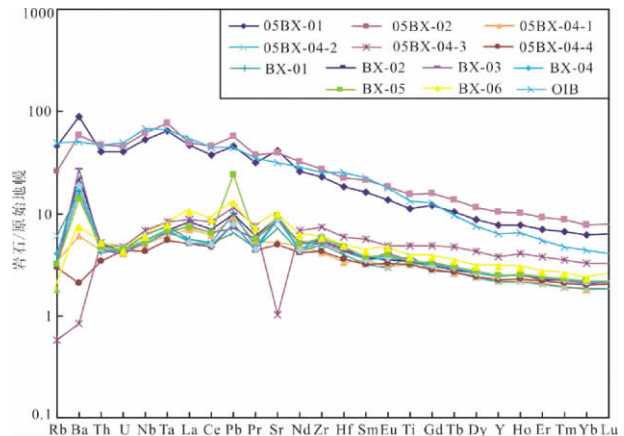


图6 原始地幔标准化图解 (原始地幔和 OIB 数据引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Primitive mantle-normalized trace element patterns (after Sun and McDonough, 1989)

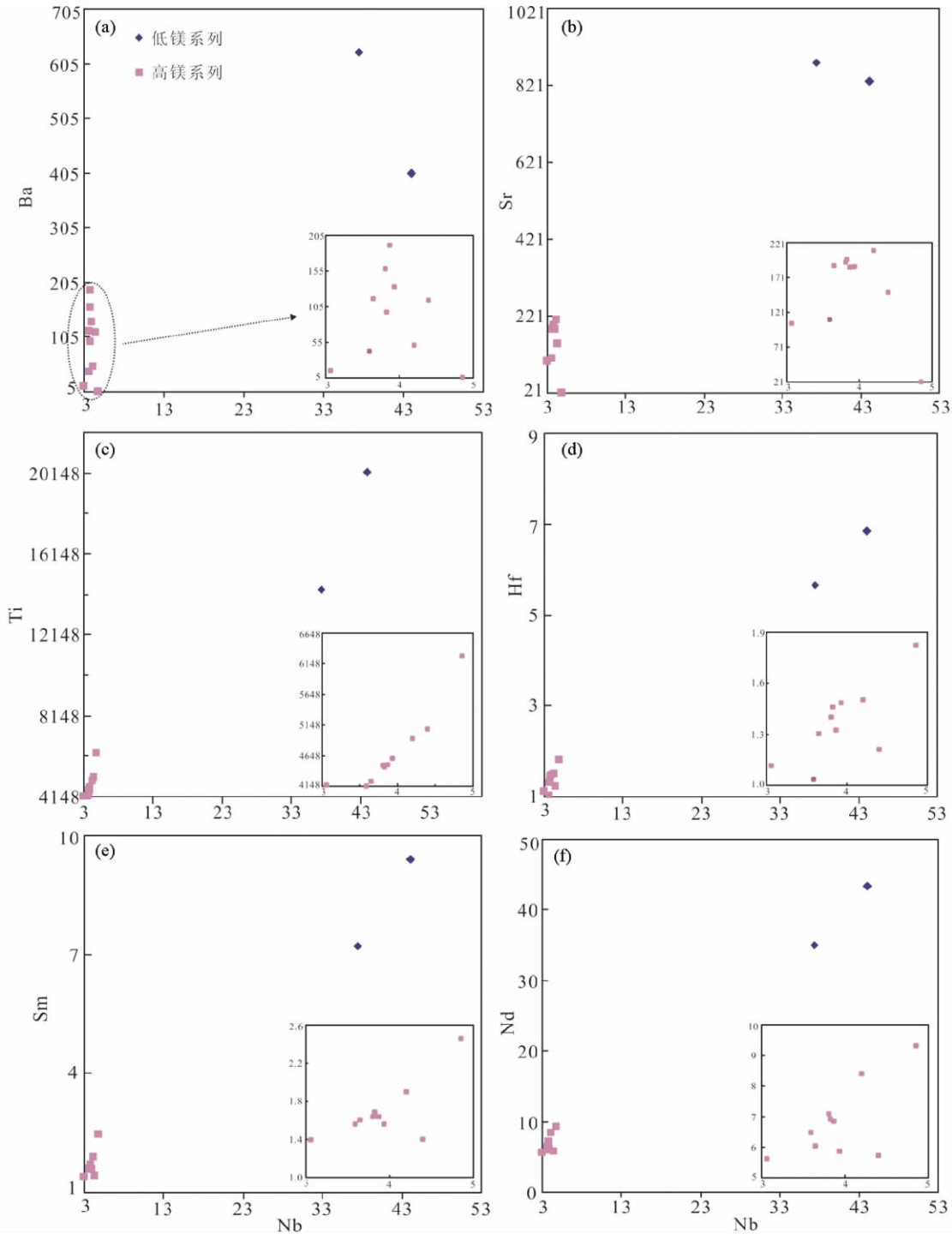


图7 海南岛军营-邦溪地区变质的镁铁质-超镁铁质熔岩的 Ba-Nb、Sr-Nb、Ti-Nb、Hf-Nb、Sm-Nb、Nd-Nb 协变图
 Fig.7 Plot of Ba , Sr , Ti , Hf , Sm and Nd abundances versus Nb contents of the Junying-Bangxi mafic-ultramafic lavas

亏损,甚至具有轻微的 Ta 正异常。Rb、Sr、Ba、Pb 等大离子亲石元素含量变化较大,明显发生了迁移活动,可能是蚀变作用引起的。这套镁铁质-超镁铁质熔岩的稀土配分图解和微量元素的原始地幔标准化图解均具有洋岛玄武岩(OIB)的相似特征,特别是低镁系列与 OIB 更加吻合(图 6)。从高镁系列到低镁系列,不相容元素的含量升高,可能是由橄榄石

堆晶造成的。

4.3 铈、钕同位素地球化学特征

本文中 Sr-Nd 同位素计算时参考的年龄值是样品 05BX-04-2 的锆石 SHRIMP U-Pb 加权平均年龄 $269 \pm 4\text{Ma}$, 锆石具有明显的岩浆振荡环带,具体测年数据及结果见 Xu *et al.*

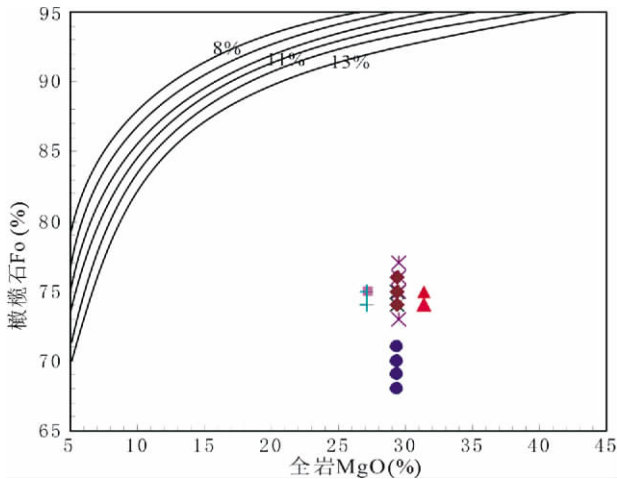


图8 橄榄石的 Fo 值对全岩 MgO 图解 (据张招崇和王福生, 2003; 张招崇等, 2005)

曲线上数字代表全岩中 FeO 的质量分数, 假定橄榄石和岩浆熔体之间的 Mg-Fe 分配系数为 0.3

Fig. 8 Bulk-rock MgO versus Fo of olivine diagram (after Zhang and Wang, 2003; Zhang et al., 2005)

The number on curves for bulk-rock FeO content, assuming a Mg-Fe olivine-liquid partition coefficient of 0.3

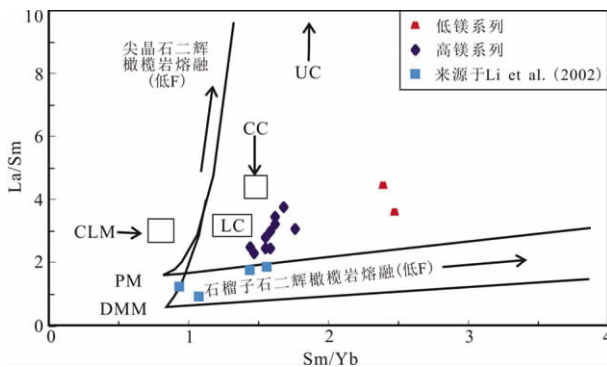


图9 La/Sm-Sm/Yb 图解(据 Lassiter and Depaolo, 1997; 张招崇等, 2005)

PM-原始地幔; DMM-亏损地幔; CLM-岩石圈地幔; LC-下地壳; CC-整个地壳; UC-上地壳

Fig. 9 La/Sm versus Sm/Yb diagram (after Lassiter and Depaolo, 1997; Zhang et al., 2005)

PM-primitive mantle; DMM-depleted mantle; CLM-continental lithospheric mantle; LC-lower crust; CC-bulk continental crust; UC-upper crust

(2007)。本区 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值除一个最低值为 +3.2 外, 主要变化范围为 +4.7 ~ +6.5 (表 3) 指示来源于亏损的地幔。高镁系列和低镁系列具有相似的 Nd 同位素组成, 表明两者可能来源于相同的源区。 $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$ 值为 0.70645 ~ 0.70715, 最高为 0.70956, 由于 Rb、Sr 在地质作用过程中为活性元素, 且军营-邦溪地区这套岩岩遭受了不同程度的蚀变和变质作

用, 故本区较高的 $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$ 很可能是受到后期蚀变和变质作用的影响。

5 讨论

岩相学观察和全岩分析测试结果表明邦溪地区该套镁铁质-超镁铁质熔岩遭受了不同程度的蚀变作用。变化的 Ba/Rb 值(7.9 ~ 100.2) 和低 K_2O/P_2O_5 值(<1) (除 05BX-01 外) 说明碱性元素发生了明显的迁移活动 (Frey et al., 1994)。这套镁铁质-超镁铁质熔岩的 Ba、Sr 含量和 Nb 含量无明显相关性, 但 Ti、Hf 和 Nb 则表现出良好的相关关系(图 7), 说明大离子亲石元素在蚀变过程中活动性较强, 而高场强元素则基本不受蚀变作用的影响 (Holland et al., 2006), 这与样品在微量元素蛛网图中所表现出的特征是一致的。另外, Sm、Nd 和 Nb 除一两个样品外, 大部分具有良好的正相关性, 也暗示了后期的变质蚀变作用对 Sm-Nd 同位素影响不大。

5.1 高镁系列的成因

高镁质岩石可以代表原始岩浆的成份, 也可能是由外来橄榄石的加入造成的, 如地幔橄榄石捕虏晶和橄榄石堆晶, 还可以代表演化的岩浆成分。本次研究的高镁系列熔岩与苦橄岩的化学成分类似(张招崇等, 2005, 2006), 因此对岩石高镁的来源即橄榄石颗粒的成因判别是很重要的。

橄榄石斑晶的电子探针结果表明(表 1): 斑晶成分比较均一, 从核部到边部 Fo 含量变化不超过 3%, 橄榄石普遍具有低 NiO (0.10% ~ 0.25%)、低 CaO、低 Fo (68 ~ 77), 及高 FeO (20.07% ~ 29.12%) 和 MnO (0.15% ~ 0.56%) 特征。利用橄榄石-熔体之间的平衡原理可对橄榄石斑晶进行成因探讨(张招崇和王福生, 2003; 张招崇等, 2005) 在 MgO-Fo-FeO 图解中(图 8), 投影点均落在了曲线的下方, 表明与这些橄榄石斑晶平衡的熔体 MgO 含量远远小于超镁铁质熔岩的 MgO 含量, 也就是说有过剩的橄榄石加入到原始岩浆中从而导致全岩具有高镁的特征。本文橄榄石斑晶的低 Fo 及显微观察无扭折带, 否定了地幔捕虏晶来源(地幔橄榄石捕虏晶多具有高的 Fo(一般 >90%), 他形, 并常具有扭折带)。另外橄榄石斑晶的成分比较均一, 核部与边部的成分相似, 说明斑晶与熔体处于平衡状态, 也间接指示其非地幔捕虏晶, 故本文样品的高镁是由大量的橄榄石堆晶引起的。

5.2 源区特征

轻稀土 La 相对于中稀土 Sm 更不相容, 这两者在尖晶石或石榴子石橄榄岩地幔部分熔融过程中均富集在熔体中, 而中稀土 Sm 相对于重稀土(如 Yb) 的富集则依靠熔融过程中是否有石榴子石作为残留相。另外, 分离结晶作用对 La/Sm 和 Sm/Yb 比值的影响相对较小, 因此, 利用 La/Sm-Sm/Yb 图解

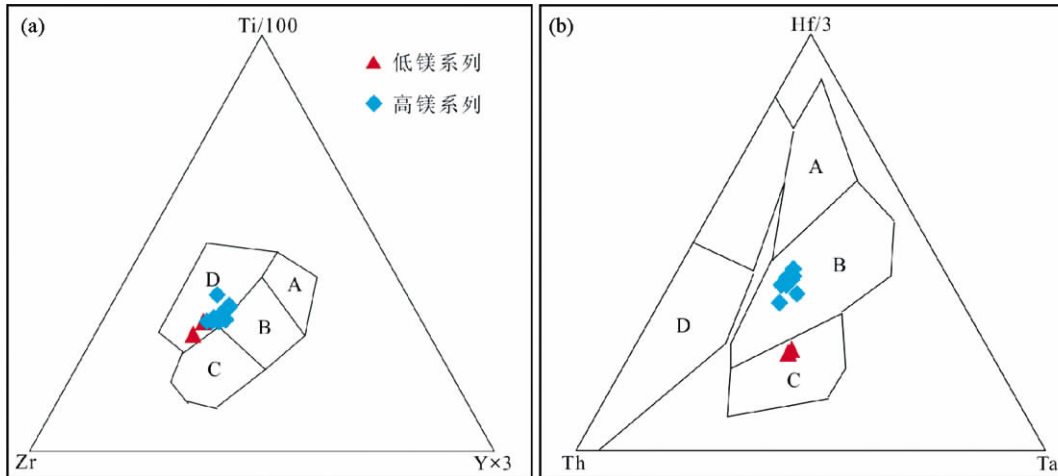


图 10 海南岛军营-邦溪地区变质的镁铁质-超镁铁质熔岩的 Ti-Zr-Y 和 Th-Hf-Ta 构造环境判别图

图 (a): A 区为岛弧拉斑玄武岩; B 区为 MORB、岛弧拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩; C 区是钙碱性玄武岩; D 区是板内玄武岩; 图 (b): A 为 N-MORB; B 区是 E-MORB 和板内拉斑玄武岩; C 区是碱性板内玄武岩; D 区为火山弧玄武岩

Fig. 10 Ti-Zr-Y and Th-Hf-Ta tectonomagmatic discrimination diagrams for the Junying-Bangxi mafic-ultramafic lavas

可对源区进行判别(图 9)(Lassiter and Depaolo, 1997)。由图 9 可以看出, 军营-邦溪地区高镁系列和低镁系列岩石均落在了源区为石榴子石二辉橄榄岩地幔的低程度熔融曲线附近, 部分数据接近下地壳, 可能是受变质作用影响。结合橄榄石的堆晶现象, 暗示两者源区经历了低程度部分熔融, 而后发生了橄榄石的分离结晶作用, 残余岩浆上升过程中携带了部分橄榄石堆晶(张招崇等, 2006), 从而有了高镁系列和低镁系列的区别。低镁系列低的 $Mg^{\#}$ 值和低的相容元素含量(如 Ni、Cr)可能与随后发生的单斜辉石的分离结晶作用有关, 这与岩相学观察(残留的单斜辉石斑晶矿物)相符合。

另外, 橄榄石中 SiO_2 含量(40% ±)一般低于玄武岩, 因此橄榄石堆晶的加入可使残余岩浆的 SiO_2 含量降低, 而高镁系列和低镁系列的 $\epsilon_{Nd}(270Ma)$ 比值在相同范围内, 表明两者应该来源于相同的源区。橄榄石堆晶低的 F_o 表明原始岩浆的 MgO 含量比较低, 可能是低镁的玄武质岩浆。

5.3 构造环境和地球动力学暗示

邦溪这套镁铁质-超镁铁质熔岩具有类似于 OIB 的稀土元素配分形式(图 5)和原始地幔标准化图解(图 6)。在 Ti-Zr-Y 和 Th-Hf-Ta 构造环境判别图解中(图 10), 这套岩石均落在板内玄武岩的分布区; 而低镁系列在 Th-Hf-Ta 图解中落在了碱性板内玄武岩区(图 10b)。以上图解均揭示了邦溪这套岩石为板内构造环境。

Th、Ta、Hf 均是强不相容元素, 地幔部分熔融过程和岩浆分离结晶过程对其比值的影响较小, 故可根据其比值进行大地构造环境的判别。本区样品的 Th/Ta 值为 1.21 ~ 1.52, Ta/Hf 值为 0.19 ~ 0.47, 变化范围比较小, 其中高镁系列 Ta/Hf 比值在 0.19 ~ 0.25, 低镁系列 Ta/Hf 为 0.46 ~ 0.47, 分别

与汪云亮等(2001)统计的大洋板内拉斑玄武岩和碱性玄武岩范围一致。其中高镁系列的 Th/Ta、Ta/Hf 值均在冰岛玄武岩-夏威夷 Koodau 玄武岩(Th/Ta = 0.4 ~ 1.6, Ta/Hf = 0.1 ~ 0.3)范围内(Frey *et al.*, 1994; Furman *et al.*, 1992)。样品的 Th/Nb 比值范围为 0.08 ~ 0.11, Nb/Zr 比值为 0.06 ~ 0.15, 也均在大洋板内玄武岩比值范围内(孙书勤等, 2003)。这些板内洋岛玄武岩在成因上通常被认为与“热点”或“地幔柱”有关(Niu, 2010)。一般认为起源于地幔柱的玄武岩的微量元素在原始地幔标准化图解中不存在 Nb 和 Ta 的亏损, 而且来自地幔柱的岩浆具有低的 La/Ta 比值, 一般在 8 ~ 15, 而受岩石圈地幔混染后 La/Ta 值增加到 25 以上, 但 La/Sm 比值变化不大; 然而如果混染了地壳物质, 则 La/Sm 值迅速升高到 5 以上(Lassiter and Depaolo, 1997)。本区内低镁系列的 La/Ta 和 La/Sm 值分别为 10.7 ~ 12 和 3.6 ~ 4.2, 由此推测, 岩浆源区可能为地幔柱, 同时没有或很少有岩石圈地幔或地壳物质的加入。在微量元素蛛网图中无 Nb、Ta 异常也说明了这一点, 因为 Nb、Ta 元素对地壳的混染往往比较敏感。其他一些微量元素比值也指示了这个特点, 如: $(La/Nb)_{PM}$ 和 $(Th/Ta)_{PM}$ 值均小于 1(Neal *et al.*, 2002)。

金沙江蛇绿岩、哀牢山蛇绿岩、越南北部 SongMa 蛇绿岩被解释为华南和印支地块之间古特提斯洋的残留, 并且这三条缝合带具有相似的演化历史, 可能为相连的同一洋盆(Jian *et al.*, 2008, 2009a, b; Lepvrier *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2000)。而海南岛“晨星蛇绿岩片”表明古特提斯洋沿金沙江-哀牢山-SongMa 缝合带已影响到海南岛(Li *et al.*, 2002); 广泛出现的海西-印支期同碰撞 S-型花岗岩, 曾认为是与古特提斯洋闭合所引起的碰撞造山有关(李孙雄等, 2005)。军营-邦溪地区这套晚二叠纪(±270Ma) OIB 型亚碱性和碱性玄武岩, 很少或没有受到地壳或岩石圈地幔的混染, 说明本

区岩石圈大大减薄或已经初始洋盆化,这一发现可能记录了晚古生代时期由于古特提斯洋向华南大陆边缘俯冲,以及同时的地幔柱作用,导致了华南大陆边缘弧后盆地的扩张以及随后的小洋盆出现的事件(Xu *et al.*, 2007, 2008)。海南岛晚古生代洋岛玄武岩(OIB型)的发现为深入揭示华南古特提斯洋的演化及其在海南岛的可能响应提供了又一新的证据。

6 结论

海南岛军营-邦溪地区变质的超镁铁质和镁铁质熔岩根据 $Mg^{\#}$ 值可分为高镁系列(76.9~81.3)和低镁系列(40.7~48.4)。经电子探针分析和岩相学观察,该套岩石高的镁含量是由橄榄石堆晶造成的;而类似于典型洋岛玄武岩(OIB)的地球化学和同位素组成特征,表明军营-邦溪地区熔岩来源于亏损地幔,可能系石榴子石-二辉橄榄岩地幔源区经低程度部分熔融形成的结果。军营-邦溪地区晚二叠纪 OIB 型洋岛玄武岩的发现,可能代表了东古特提斯洋演化在海南岛的又一记录,推测系晚古生代时期由于东古特提斯洋板块的俯冲及同时可能的地幔柱作用,从而导致华南大陆边缘弧后盆地扩张的产物。这一认识为探讨华南古特提斯洋的演化及其在海南岛的响应提供了重要证据。不过,由于强烈的构造置换,军营-邦溪地区所存在的这套高镁和低镁系列熔岩是否存在层位上的差异,以及是否还存在相应的侵入岩套,仍有待下一步研究。

致谢 野外考察得到了海南省地质勘查局资源环境调查院符启基工程师的帮助和支持;张玉泉研究员对本文初稿提出了一些合理的建议和在实际工作中给予了很大的帮助;审稿人对本文提出了建设性修改意见;在此一并感谢。

References

- Fang Z, Zhao JX and McCulloch MT. 1992. Geochemical and Nd isotopic study of Palaeozoic bimodal volcanics in Hainan Island, South China: Implications for rifting tectonics and mantle reservoirs. *Lithos*, 29(1-2): 127-139
- Frey FA, Garcia MO and Roden MF. 1994. Geochemical characteristics of Koolau Volcano: Implications of intershield geochemical differences among Hawaiian volcanoes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(5): 1441-1462
- Furman T, Frey FA and Meyer PS. 1992. Petrogenesis of evolved basalts and rhyolites at Austurhorn, southeastern Iceland: The role of fractional crystallization. *Journal of Petrology*, 33(6): 1405-1445
- Hollanda MHBM, Pimentel MM, Oliveira DC and De Sá EFJ. 2006. Lithosphere-asthenosphere interaction and the origin of Cretaceous tholeiitic magmatism in Northeastern Brazil: Sr-Nd-Pb isotopic evidence. *Lithos*, 86(1-2): 34-49
- Jian P, Liu DY and Sun XM. 2008. SHRIMP dating of the Permo-Carboniferous Jinshajiang ophiolite, southwestern China: Geochronological constraints for the evolution of Paleo-Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5-6): 371-384
- Jian P, Liu DY, Kröner A, Zhang Q, Wang YZ, Sun XM and Zhang W. 2009a. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (I): Geochemistry of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks. *Lithos*, 113(3-4): 748-766
- Jian P, Liu DY, Kröner A, Zhang Q, Wang YZ, Sun XM and Zhang W. 2009b. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (II): Insights from zircon ages of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks and generation of the Emeishan CFB province. *Lithos*, 113(3-4): 767-784
- Lassiter JC and Depaolo DJ. 1997. Plume/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: Chemical and isotopic constraints. In: Mahoney JJ and Coffin MF (eds.). *Geophysical Monograph*. Washington, DC: American Geophysical Union, 100: 335-355
- Lepvrier C, Van Vuong N, Maluski H, Thi PT and Van Vu T. 2008. Indosinian tectonics in Vietnam. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(2-3): 94-111
- Li SX, Yun P, Fan Y and Zhou JB. 2005. Zircon U-Pb age and its geological significance for Qiongzong pluton in Qiongzong area, Hainan Island. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(2): 227-233, 241 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Zhou HW, Ding SJ, Lee CY, Zhang RJ, Zhang YM and Ge WC. 2000. Sm-Nd isotopic constraints on the age of the Bangxi-Chenxing ophiolite in Hainan Island: Implications for the tectonic evolution of eastern Paleo-Tethys. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3): 425-432 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Zhou HW, Ding SJ, Chung SL, Ding SJ, Liu Y, Lee CY, Ge WC, Zhang YM and Zhang RJ. 2002. Geochemical and Sm-Nd isotopic characteristics of metabasites from central Hainan Island, South China and their tectonic significance. *Island Arc*, 11(3): 193-205
- Li XH, Li ZX, Li WX and Wang YJ. 2006. Initiation of the Indosinian orogeny in South China: Evidence for a Permian magmatic arc on Hainan Island. *The Journal of Geology*, 114(3): 341-353
- Liang XQ and Fan WM. 2000. Sm-Nd age of Tunchang basaltic komatiites and its geological significance in Hainan Island. *Scientia Geologica Sinica*, 35(2): 240-244 (in Chinese with English abstract)
- Liang XR, Wei GJ, Li XH and Liu Y. 2002. Rapid and precise measurement for $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ isotopic ratios using a multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometer. *Rock and Mineral Analysis*, 21(4): 247-251 (in Chinese with English abstract)
- Liu Y, Liu HC and Li XH. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS. *Geochimica*, 25(6): 552-558 (in Chinese with English abstract)
- Neal CR, Mahoney JJ and Chazey WJ. 2002. Mantle sources and the highly variable role of continental lithosphere in basalt petrogenesis of the Kerguelen Plateau and Broken Ridge LIP: Results from ODP Leg 183. *Journal of Petrology*, 43(7): 1177-1205
- Niu YL. 2010. Some basic concepts and problems on the petrogenesis of intra-plate ocean island basalts. *Chinese Science Bulletin*, 54(22): 4148-4160
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. London: Geological Society Special Publication, 42(1): 313-345
- Sun SQ, Wang YL and Zhang CJ. 2003. Discrimination of the tectonic settings of basalts by Th, Nb and Zr. *Geological Review*, 49(1): 40-47 (in Chinese with English abstract)
- Wang XF, Metcalfe I, Jian P, He LQ and Wang CS. 2000. The Jinshajiang-Ailaoshan Suture Zone, China: Tectonostratigraphy, age and evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(6): 675-690
- Wang YL, Zhang CJ and Xiu SZ. 2001. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 413-421 (in Chinese with English abstract)

- Wei GJ, Liang XR, Li XH and Liu Y. 2002. Precise measurement of Sr isotopic composition of liquid and solid base using (LP) MC-ICPMS. *Geochimica*, 31(3): 295–299 (in Chinese with English abstract)
- Xia BD, Shi GY, Fang Z, Yu JH, Wang CY, Tao XC and Li HM. 1991. The Late Palaeozoic rifting in Hainan Island, China. *Acta Geological Sinica*, 65(2): 103–115 (in Chinese with English abstract)
- Xu DR, Lin G, Liang XQ, Chen GH and Tang HF. 2001. The records of the evolution of Precambrian lithosphere: The evidences of petrology and geochemistry of basic rocks on Hainan island. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 598–608 (in Chinese with English abstract)
- Xu DR, Xia B, Bakun-Czubarow N, Ma C, Li PC, Bachlinski R and Chen GH. 2006. Metamorphic characteristics of the Chenxing metabasite massif in Tunchang area, Hainan Island, South China and its tectonic implication. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2987–3006 (in Chinese with English abstract)
- Xu DR, Xia B, Li PC, Chen GH, Ma C and Zhang YQ. 2007. Protolith natures and U-Pb sensitive high mass-resolution ion microprobe (SHRIMP) zircon ages of the metabasites in Hainan Island, South China: Implications for geodynamic evolution since the late Precambrian. *Island Arc*, 16(4): 575–597
- Xu DR, Ma C, Bakun-Czubarow N, Li PC, Xia B and Zhang YQ. 2007. Petrological, mineralogical and geochemical characteristics of Ordovician volcanic-clastic sedimentary rocks in Bangxi area, Northwest Hainan Island, South China: Implications for provenance and tectonic setting. *Geochimica*, 36(1): 11–26 (in Chinese with English abstract)
- Xu DR, Xia B, Bakun-Czubarow N, Bachlinski R, Li P, Chen G and Chen T. 2008. Geochemistry and Sr-Nd isotope systematics of metabasites in the Tunchang area, Hainan Island, South China: Implications for petrogenesis and tectonic setting. *Mineralogy and Petrology*, 92(3–4): 361–391
- Zhang YM, Zhang RJ, Yao HZ and Ma GG. 1997. The Precambrian crustal tectonic evolution in Hainan Island. *Earth Science*, 22(4): 395–400 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YM, Fu JM, Zhao ZJ, Xu AW, Wu GJ and Zeng BF. 1998. Petrographic characteristics and Sm-Nd isotopic dating of the metamorphic basic volcanic rocks in western part of Hainan Island. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 18(1): 79–84 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZC and Wang FS. 2003. A method for identifying primary magma: Examples from picrite and alkali basalts. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 33(2): 130–134 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZC, Wang FS and Hao YL. 2005. Picrites from the Emeishan large igneous province: Evidence for the mantle plume activity. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 24(1): 17–22 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZC, Mahoney JJ, Wang FS, Zhao L, Ai Y and Yang TZ. 2006. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the western Emeishan flood basalt province, China: Evidence for a plume-head origin. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1538–1552 (in Chinese with English abstract)
- U-Pb 年龄及其地质意义. *大地构造与成矿学*, 29(2): 227–233, 241
- 李献华, 周汉文, 丁式江, 李寄嶠, 张仁杰, 张业明, 葛文春. 2000. 海南岛“邦溪-晨星蛇绿岩片”的时代及其构造意义——Sm-Nd 同位素制约. *岩石学报*, 16(3): 425–432
- 梁新权, 范蔚茗, 许德如. 2000. 海南岛屯昌玄武质科马提岩 Sm-Nd 同位素年龄及其地质意义. *地质科学*, 35(2): 240–244
- 梁细荣, 韦刚健, 李献华, 刘颖. 2002. 多收集器等离子体质谱快速精确测定钨同位素比值. *岩矿测试*, 21(4): 247–251
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. *地球化学*, 25(6): 552–558
- 孙书勤, 汪云亮, 张成江. 2003. 玄武岩类岩石大地构造环境的 Th、Nb、Zr 判别. *地质论评*, 49(1): 40–47
- 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 2001. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别. *岩石学报*, 17(3): 413–421
- 韦刚健, 梁细荣, 李献华, 刘颖. 2002. (LP) MC-ICPMS 方法精确测定液体和固体样品的 Sr 同位素组成. *地球化学*, 31(3): 295–299
- 夏邦栋, 施光宇, 方中, 于津海, 王赐银, 陶仙聪, 李惠民. 1991. 海南岛晚古生代裂谷作用. *地质学报*, 65(2): 103–115
- 许德如, 林舸, 梁新权, 陈广浩, 唐红峰. 2001. 海南岛前寒纪岩石圈演化的记录: 基性岩类岩石地球化学证据. *岩石学报*, 17(4): 598–608
- 许德如, 夏斌, Bakun-Czubarow N, 马驰, 李鹏春, Bachlinski R, 陈广浩. 2006. 海南岛屯昌晨星地区变基性岩体变质特征及构造意义. *岩石学报*, 22(12): 2987–3006
- 许德如, 马驰, Bakun-Czubarow N, 李鹏春, 夏斌, 张玉泉. 2007. 海南岛西北部邦溪地区奥陶纪火山-碎屑沉积岩岩石学、矿物学和地球化学: 源区及构造环境暗示. *地球化学*, 36(1): 11–26
- 张业明, 张仁杰, 姚华舟, 马国干. 1997. 海南岛前寒武纪地壳构造演化. *地球科学*, 22(4): 395–400
- 张业明, 付建明, 赵子杰, 徐安武, 吴桂捷, 曾波夫. 1998. 海南岛西部变基性火山岩的岩石特征及 Sm-Nd 同位素定年. *矿物岩石*, 18(1): 79–84
- 张招崇, 王福生. 2003. 一种判别原始岩浆的方法——以苦橄岩和碱性玄武岩为例. *吉林大学学报(地球科学版)*, 33(2): 130–134
- 张招崇, 王福生, 郝艳丽. 2005. 峨眉山大火成岩省中的苦橄岩: 地幔柱活动证据. *矿物岩石地球化学通报*, 24(1): 17–22
- 张招崇, Mahoney JJ, 王福生, 赵莉, 艾羽, 杨铁铮. 2006. 峨眉山大火成岩省西部苦橄岩及其共生玄武岩的地球化学: 地幔柱头部熔融的证据. *岩石学报*, 22(6): 1538–1552

附中文参考文献

李孙雄, 云平, 范渊, 周进波. 2005. 海南岛琼中地区琼中岩体锆石