

科马提岩与苦橄岩的区别及对若干晚古生代“科马提岩”的质疑

李振焕^{1,2}, 刘学龙¹, 朱月琴^{2,3}, 张旗⁴, 罗应¹, 张昌振¹, 陈建航¹,
王帅帅¹, 杨富成¹

LI Zhenhuan^{1,2}, LIU Xuelong¹, ZHU Yueqin^{2,3}, ZHANG Qi⁴, LUO Ying¹, ZHANG Changzhen¹,
CHEN Jianhang¹, WANG Shuaishuai¹, YANG Fucheng¹

1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
2. 自然资源部地质信息技术重点实验室, 北京 100037;
3. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;
4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

1. *College of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;*
2. *Key Laboratory of Geological Information Technology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100037, China;*
3. *Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;*
4. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

摘要:以往学术界更多的关注科马提岩和苦橄岩的相似性,忽略其差异。通过全数据模式,采集数据库内全球的太古宙科马提岩、后太古宙低/高钛苦橄岩数据,对比三者之间的差异发现,科马提岩更富MgO、Cr、Ni、Cs、Pb、Co和Zn,其次为低钛苦橄岩(除Co和Zn),其余主量、微量元素的含量由高至低依次为高钛苦橄岩、低钛苦橄岩、科马提岩。依据元素间的差异(如Cr/Ga、MgO/Ga、MnO/Zr、Cr/Zr等),采用密度分布函数(Density Distribution)在Matlab软件中绘制出可有效区分3类岩石的等密度判别图,并用该图对若干晚古生代“科马提岩”的岩性重新厘定。结合岩相学和地球化学特征研究表明,晚古生代“科马提岩”中,印度东部为高钛苦橄岩,越南为化学成分与科马提岩类似的低钛苦橄岩,印度拉达克地区为低钛苦橄岩。

关键词:科马提岩;低/高钛苦橄岩;等密度判别图;晚古生代;重新厘定

中图分类号:P588.14⁺6;P628 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2019)12-1971-10

Li Z H, Liu X L, Zhu Y Q, Zhang Q, Luo Y, Zhang C Z, Chen J H, Wang S S, Yang F C. Difference between komatiites and picrites and a discussion on some Late Paleozoic "komatiites". *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(12):1971-1980

Abstract: In the past, academia paid much attention to the similarity between komatiites and picrites, but ignored their differences. In this paper, the global data of Archaean komatiites and Post-Archaean low/high titanium picrites in the database were collected by full data model. Based on comparing the differences between them, the authors found that komatiites are richer in MgO, Cr, Ni, Cs, Pb,

收稿日期:2019-04-20;修订日期:2019-07-30

资助项目:中国地质调查局项目《云南省格咱铜多金属整装勘查区普朗斑岩型铜矿地质数据挖掘研究》(编号:KKF0201821043)、《国家地质大数据汇聚与管理》(编号:DD20190381A)、《资源环境重大问题综合区划与开发保护策略研究》(编号:DD20190463)、国家自然科学基金项目《滇西北中甸铜厂沟燕山期斑岩型Mo-Cu矿床热液蚀变分带结构及发育机制研究》(批准号:41862009)、昆明理工大学重点学科建设经费项目《地质资源与地质工程(省级一流学科)》(编号:1407839305)和云南省基础研究计划项目《滇西格咱斑岩铜铅矿带多期成矿作用研究》(编号:2019FA018)

作者简介:李振焕(1988-),女,在读硕士生,工程师,矿床学专业,从事矿床学研究。E-mail:18204143298@163.com

通讯作者:刘学龙(1983-),男,博士,教授,矿床学专业,从事云南“三江”地区的地质矿产研究工作及矿床学教学工作。

E-mail:xuelongliu@foxmail.com

Co and Zn, followed by low-titanium picrites (except for Co and Zn). As for the other main and trace elements, high-titanium picrites has the highest content, followed by low-titanium picrites and then by komatiites. Based on the differences between elements such as Cr/Ga, MgO/Ga, MnO/Zr and Cr/Zr, the authors used density distribution to draw an isodensity discriminant map which can effectively distinguish the three types of rocks, and redefined the lithology of some Late Paleozoic "komatiites" with this diagram. The results of lithofacies and geochemical characteristics show that, in the Late Paleozoic "komatiites", the rocks in the eastern part of India are high-titanium picrites, those in Vietnam are low-titanium picrites with similar chemical composition to komatiites, and those in Ladak area of India are low-titanium picrites.

Key words: komatiites; low/high titanium picrites; discriminant maps; Late Paleozoic; redefine

科马提岩和苦橄岩作为超铁镁质火山岩,在地球化学性质、成因、形成条件及源区方面具相似性^[1],但学术界对二者的认识尚未完全统一。芬兰北部的一些科马提岩和苦橄岩存在差别,被认为成因相同^[2-6];戈尔戈纳岛的科马提岩和苦橄岩在地球化学方面存在微小差别,却被认为源区不同^[7]。世界上典型科马提岩形成时的构造环境以大洋高原、岛弧和裂谷为主^[8],仍存争议。由于太古宙构造和现代构造具有明显差异,将现代主量、微量元素地球化学标志用于太古宙就表现出诸多矛盾^[9-10]。也许是太古宙与现代的地球化学标志的基本含义不同,或是历史演化过程中地球化学性质发生系统变化产生了不确定性,才使现代化学构造应用于太古宙受到限制^[11]。Moyen等^[12]提出,应忽略太古宙与现代火成岩在成分和构造背景上的相互联系(如岩石大地构造判别图),从源头上认识、比较太古宙和现代地球化学模式及熔融条件之间的差异。科马提岩岩浆基本上能代表初始岩浆的特征,但苦橄岩不能(除非苦橄岩中的橄榄石结晶后留在原位),因此合理区分上述2种岩石对于研究初始岩浆的特征、探索岩石形成的构造环境、反演源区的物质组成和熔融条件,以及岩浆形成、演化过程等都有十分重要的意义。

通常,科马提岩具有典型的鬃刺结构(如澳大利亚伊尔岗克拉通科马提岩^[13]),地球化学成分上: $30\% < \text{SiO}_2 < 52\%$ 、 $\text{MgO} > 18\%$ 、 $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) < 2\%$ 、 $\text{TiO}_2 < 1\%$ 的为科马提岩, $\text{TiO}_2 > 1\%$ 的则为麦美奇岩; $30\% < \text{SiO}_2 < 52\%$ 、 $\text{MgO} > 12\%$ 、 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} < 3\%$ 的为苦橄岩^[14-16]。当然,若科马提岩受变质作用影响,鬃刺结构被完全破坏,按上述特征很难区分二者,有学者就将科马提岩等同于苦橄岩,文献中常用picrites/komatiites表述。2018年,罗应等^[17]开启了一个全新的研究方向——全数据模式,即处理全球太古宙科马提岩和后太古宙的全部苦橄岩数据后,用

MATLAB绘制置信椭圆二元判别图,利用明显的化学特征区分2类岩石。在采集基础数据过程中发现,数据库记载的越南、印度拉达、希腊和印度东部地区的几个中生代或晚古生代的科马提岩数据^[18-21]较特别,它们是否为科马提岩值得进一步研究。因为希腊中生代“科马提岩”只有1个数据,代表性不强,可以忽略,对越南、印度拉达和印度东部地区晚古生代“科马提岩”的岩性厘定便成为本次研究的重点。

本次研究以前人成果为基础,沿大数据方向深入挖掘,利用科马提岩、低钛苦橄岩和高钛苦橄岩地球化学特征的明显差异,通过MATLAB软件绘制等密度分布判别图,对3类岩石进行更加细致的区分,然后根据判别图结果、岩相学和地球化学特征重新判别上述晚古生代“科马提岩”的岩性。

1 数据采集与清洗

1.1 数据采集

本次研究依据上文所述的地球化学标志,从GEOROC (<http://geroc.mach-mainz.gwdg.de/georoc>)中采集到的全部苦橄岩和科马提岩数据分别为25002个和4617个,信息采集内容包括样品编号、年龄、采样地点、元素及其同位素测试数据等。

1.2 数据清洗

为使计算数据和目标一致,计算前对收集数据进行清洗,删除与计算目标无关、重复或明显错误的的数据,数据清洗的主要方式为:①保留火山岩数据,删除侵入岩、沉积岩、变质岩、地幔包体等数据;②删除重复数据;③保留太古宙科马提岩与后太古宙苦橄岩数据;④为有效减少不同实验室带来的系统误差,同时减少岩石在后期蚀变过程中造成的成分变异,对于主量元素数据齐全的样品,主量元素的含量和回归为100%;⑤删除某些元素含量高出平均值一个数量级以上的数据,主量元素异常的

删除样品的全部数据,微量元素异常的只删除异常数据;⑥依据 TiO_2 含量,从后太古宙苦橄岩中分选出低钛苦橄岩($\text{TiO}_2 \leq 1\%$)和高钛苦橄岩($\text{TiO}_2 > 1\%$)数据。

按上述方式清洗后,太古宙科马提岩、后太古宙低钛苦橄岩和高钛苦橄岩数据分别为 2305 个、3125 个及 3710 个,

1.3 等密度曲线分布图绘制

对清洗过的数据,计算平均值,最终挑选出 9 个主量元素、20 个微量元素和 2 个稀土元素参与后续计算和密度分布图的绘制。使用 MATLAB 软件计算选定的 31 个元素数据间的比值并求比值对数,取元素比值的对数值作为坐标轴(X轴和Y轴)绘制三元置信椭圆图。因置信椭圆将样品点的分布图形进行了规则化处理,这里不直接使用,而是挑选出高置信椭圆图(交叠率低),按照其坐标采用密度分布函数(Density Distribution)绘制 80%、70%及 60%的等密度曲线分布图,最终筛选出区分度较高的等密度图,作为太古宙科马提岩、后太古宙低钛苦橄岩和高钛苦橄岩的判别图。

2 数据计算结果

2.1 基础数据均值对比分析结果

对比分析清洗后的科马提岩、低钛和高钛苦橄岩数据的平均值发现如下特征。

(1)主量元素方面, MgO 含量为太古宙科马提岩(29.77%)>后太古宙低钛苦橄岩(24.22%)>后太古宙高钛苦橄岩(17.38%),3类岩石的 MnO 含量基本相同(分别为 0.18%、0.16%、0.18%);其他主量元素的含量均表现为后太古宙高钛苦橄岩>后太古宙低钛苦橄岩>太古宙科马提岩,其中 K_2O 、 Na_2O 和 P_2O_5 含量几乎依次递减一半, TiO_2 含量是低钛苦橄岩(0.43%)和科马提岩(0.33%)较接近,高钛苦橄岩(1.95%)明显偏高。

(2)微量元素方面, Cr 、 Ni 、 Cs 、 Pb 含量表现为太古宙科马提岩>后太古宙低钛苦橄岩>后太古宙高钛苦橄岩, Co 和 Zn 含量表现为太古宙科马提岩>后太古宙高钛苦橄岩>后太古宙低钛苦橄岩,其他微量元素含量均表现为后太古宙高钛苦橄岩>后太古宙低钛苦橄岩>太古宙科马提岩。

(3)稀土元素方面,全部元素的含量都表现为后太古宙高钛苦橄岩>后太古宙低钛苦橄岩>太

古宙科马提岩,且前者较后者的稀土元素含量几乎高出 1 倍。

上述分析结果说明,除特殊情况外,科马提岩、低钛和高钛苦橄岩的主量、微量及稀土元素的含量总体一致,均以后太古宙高钛苦橄岩>后太古宙低钛苦橄岩>太古宙科马提岩为主(表 1)。

为更加直观地说明太古宙科马提岩、后太古宙低钛苦橄岩和高钛苦橄岩的区别,用基础数据的均值绘制成稀土元素配分模式图(图 1-A)及原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 1-B),具体图解如下。

①图 1-A 中, Sc 在低钛和高钛苦橄岩中含量近似,其他元素的含量则表现为后太古宙高钛苦橄岩>后太古宙低钛苦橄岩>太古宙科马提岩,而微量元素的含量差异明显,可能是不同的源区和构造背景所致。

②图 1-B 中,太古宙科马提岩、后太古宙低钛苦橄岩和高钛苦橄岩的稀土元素含量分别在 $3 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ 、 $8 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}$ 、 $8 \times 10^{-6} \sim 60 \times 10^{-6}$ 之间, Lu 含量最低,低钛和高钛苦橄岩近似,均比科马提岩高出约 2 倍; La 含量最高,太古宙高钛苦橄岩>后太古宙低钛苦橄岩>太古宙科马提岩,后者较前者均高出 1~5 倍。科马提岩中轻稀土元素(LREE)略亏损,苦橄岩 LREE 整体富集,3类岩石的稀土元素含量差异较大。

2.2 等密度判别图

为进一步探索三者之间的区别,本次研究从 MATLAB 软件计算的 31529 个比值中挑选出 200 个交叠率小于 20%的置信椭圆图,从中二次筛选出 15 个区分度较高的,以相同坐标按照 60%、70%和 80%的分布密度绘制等密度曲线图,最终选择区分效果好的 6 个(图 2)判别太古宙科马提岩、后太古宙低钛苦橄岩和高钛苦橄岩。判别图中 3 类岩石的样品点存在混合交叉现象,如某些科马提岩样品点落在低钛苦橄岩区,低钛苦橄岩样品点有的落在高钛苦橄岩区,但 3 类岩石样品点分布相对集中(密度为 60%、70%和 80%)的区域之间的界线较清晰。

元素含量的差异可作为判别 3 类岩石的良好标志,不同岩石相同元素的含量不同,如图 2-E 的 X 轴为 $\lg(\text{MgO}/\text{Ga})$,主量元素 MgO 的平均含量表现为科马提岩>低钛苦橄岩>高钛苦橄岩,微量元素 Ga 的平均含量表现为科马提岩最低<低钛苦橄岩<高钛苦橄岩,元素含量的差异性,会在其求比、比值取

表1 全球太古宙科马提岩、后太古宙(高/低钛)苦橄岩与部分晚古生代科马提岩主量、微量和稀土元素平均值统计
 Table 1 Statistical table of the means of major, trace and rare earth elements of Archaean komatiites, Post-Archaean picrites and some Late Palaeozoic komatiites

元素	太古宙科马提岩		后太古宙低钛苦橄岩		后太古宙高钛苦橄岩		越南	印度东部	印度拉克
	平均值	观测数	平均值	观测数	平均值	观测数			
SiO ₂	46.22	2305	46.24	3125	46.50	3710	43.35	31.68	43.81
TiO ₂	0.33	2305	0.43	3125	1.95	3710	0.49	1.41	0.38
Al ₂ O ₃	5.76	2305	8.64	3119	10.08	3710	9.59	5.86	7.97
Fe ₂ O ₃	4.64	512	4.86	1328	5.82	1406	11.12	7.52	
FeO	7.94	486	8.50	2563	10.01	3070			13.22
CaO	5.66	2304	7.44	3122	8.97	3710	8.65	5.02	4.43
MgO	29.77	2305	24.22	3125	17.38	3710	21.61	43.59	28.63
MnO	0.18	2241	0.16	3108	0.18	3693	0.17	0.12	0.26
K ₂ O	0.05	2258	0.20	3125	0.39	3710	0.03	0.42	0.52
Na ₂ O	0.23	2288	0.90	3125	1.52	3710	0.65	0.43	0.75
P ₂ O ₅	0.04	2097	0.07	2831	0.24	3664	0.03	0.18	0.05
Sc	20.28	931	30.77	1384	27.38	1546	32.45	65.59	20.25
V	128.3	1608	199.83	1629	235.12	2034	186.60	568.43	
Cr	2598.51	1947	1533.39	1807	1065.44	2212	2325.00	538.74	1887.25
Co	103.96	1562	76.73	1225	80.16	1098	76.90	81.73	84.00
Ni	1528.32	2111	737.04	1928	667.86	2301	986.80	119.04	962.25
Cu	40.57	1393	73.36	1236	99.49	1182	95.40	113.95	132.75
Zn	78.94	1291	73.93	1171	102.16	1683	74.00	355.11	103.50
Ga	5.93	638	10.52	772	15.02	1164		39.83	7.00
Rb	2.60	1466	7.83	1571	9.78	2272	2.58	226.56	14.75
Sr	28.23	1616	128.66	1817	290.63	2386	40.84	58.04	76.25
Y	6.61	1587	12.45	1789	20.2	2278	12.82	75.39	8.00
Zr	16.16	1683	35.93	1787	128.7	2367	18.12	226.00	40.25
Nb	2.31	1458	3.24	1529	17.44	2168	0.54	0.95	4.75
Cs	3.51	678	1.25	598	0.78	603		13.33	20.25
Ba	15.07	1167	73.14	1643	153.07	2302	20.07	104.65	253.50
Hf	0.45	816	1.07	1011	3.25	1382	0.62	4.77	
Ta	0.04	718	0.23	950	1.13	1220		0.62	
Pb	3.53	958	1.89	804	1.53	1402		45.53	10.00
Th	0.15	1065	0.77	1225	1.57	1648	0.06	4.11	
U	0.04	803	0.30	994	0.45	1357	0.02	0.66	
La	1.04	1386	4.00	1304	13.52	1558	0.71	15.81	5.98
Ce	2.50	1117	9.84	1437	33.20	2051	1.97	39.30	11.24
Pr	0.43	841	2.49	987	3.19	1182	0.34	6.00	1.16
Nd	2.11	1090	6.09	1361	19.70	1768	2.00	28.92	5.06
Sm	0.70	1143	1.70	1320	4.69	1698	0.83	8.20	1.33
Eu	0.25	1087	0.59	1288	1.52	1643	0.38	2.87	0.51
Gd	0.91	1015	2.00	1193	4.55	1355	1.53	10.56	1.23
Tb	0.17	870	0.34	1111	0.71	1474	0.28	1.97	0.25
Dy	1.12	1029	2.21	1159	3.90	1439	1.97	11.25	1.54
Ho	0.23	823	0.46	1135	0.74	1226	0.44	2.61	0.35
Er	0.69	1016	1.32	1161	1.90	1295	1.29	8.19	1.06
Tm	0.10	694	0.20	950	0.26	1102	0.19	1.29	0.16
Yb	0.67	1121	1.29	1310	1.54	1668	1.25	7.07	0.97
Lu	0.10	985	0.19	1198	0.22	1563	0.19	1.09	0.16

注:越南地区样品11个^[18],印度东部地区样品10个^[21],印度拉克样品4个^[20]。主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为10⁻⁶

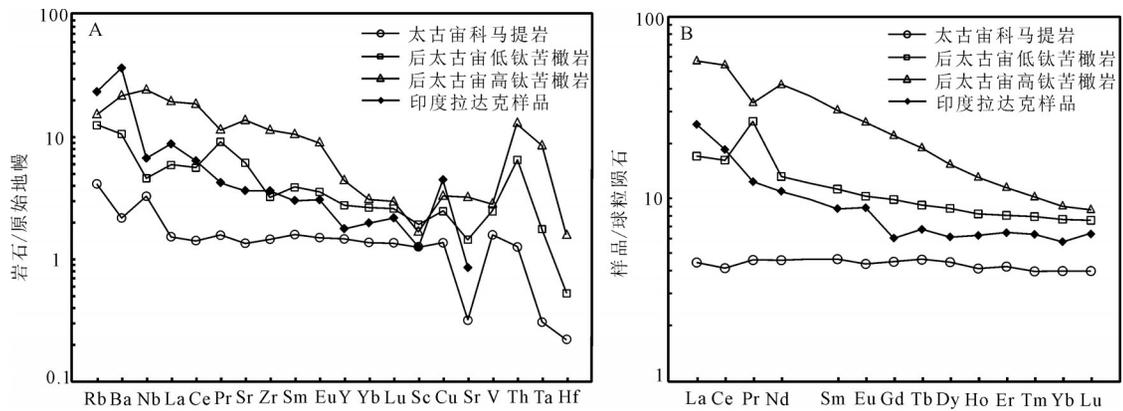


图1 科马提岩、低钛苦橄岩和高钛苦橄岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(A)及稀土元素球粒陨石标准化配分图(B)

Fig. 1 Komatiites, low-titanium picrites and high-titanium picrites standardized cobweb maps of trace elements in the primitive mantle (A) and rare earth chondrites (B)

对数过程中逐级传递。 Cr/Ga 、 MgO/Ga 、 MnO/Zr 、 Cr/Zr 等元素比值的差异明显,以其对数值为坐标的判别图中,太古宙科马提岩、后太古宙低钛苦橄岩和高钛苦橄岩界线清晰、区别较明显(坐标轴为 $X-Y$)。

图2-A为 $\lg(TiO_2/Sc) - \lg(Na_2O/Ni)$,科马提岩贫 Na_2O 、富 Ni ,在判别图下方;低钛苦橄岩 TiO_2/Sc 值与科马提岩近似, Na_2O/Ni 值显著偏高,在判别图中位于科马提岩上方;高钛苦橄岩富 TiO_2 、贫

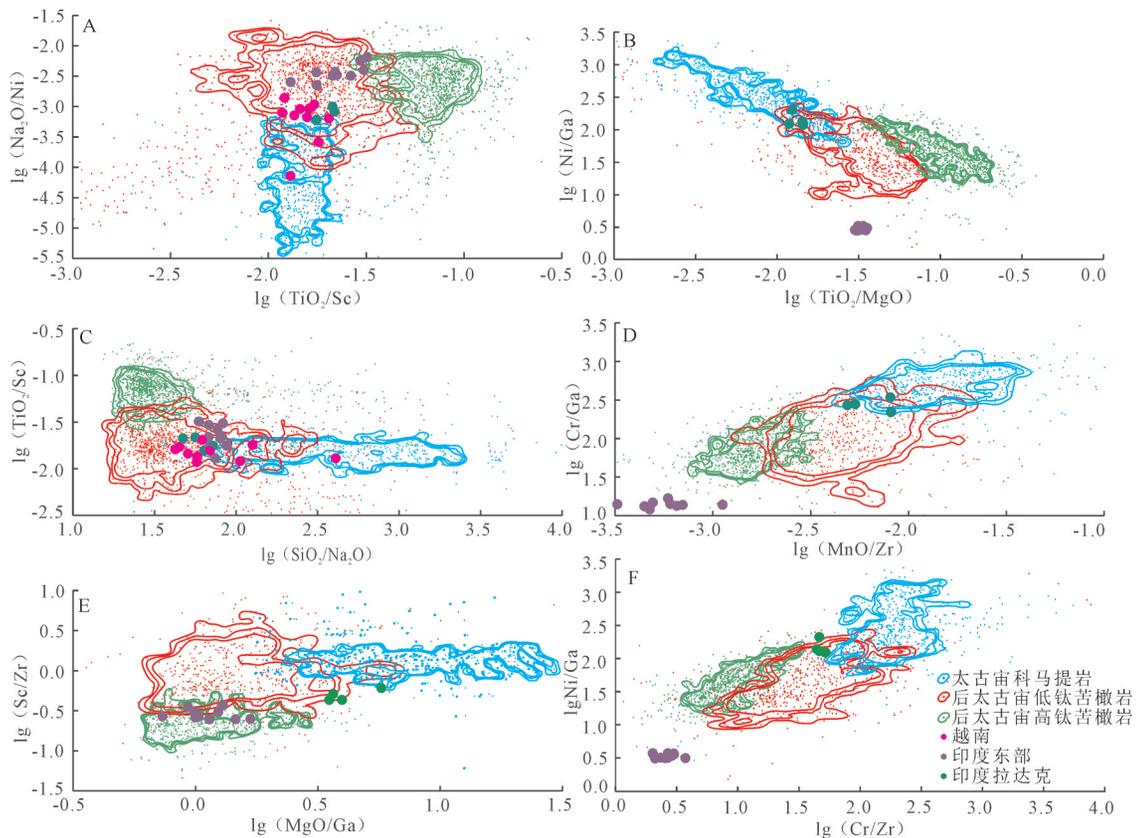


图2 太古宙科马提岩、后太古宙低钛苦橄岩和高钛苦橄岩等密度判别图

Fig. 2 Density discriminant maps of Archean komatiites, Post-Archean low-titanium picrites and high-titanium picrites

Sc,在判别图右上方。

图2-B为 $\lg(\text{TiO}_2/\text{MgO})-\lg(\text{Ni}/\text{Ga})$,科马提岩贫Ga、富Ni,在判别图左上方;高钛苦橄岩贫Ni、富Ga,在判别图右下方;低钛苦橄岩在二者之间。

图2-C为 $\lg(\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O})-\lg(\text{TiO}_2/\text{Sc})$,科马提岩、低钛苦橄岩和高钛苦橄岩的 SiO_2 含量相差较小, Na_2O 含量差别明显,科马提岩贫 Na_2O ,在判别图右方;高钛苦橄岩富Ti、贫Sc,在判别图左上方;低钛苦橄岩Sc含量最高, TiO_2 含量较低,在判别图左方。

图2-D为 $\lg(\text{MnO}/\text{Zr})-\lg(\text{Cr}/\text{Ga})$,科马提岩、低钛苦橄岩和高钛苦橄岩的Mn含量相差较小,其他元素差别明显。科马提岩贫Zr和Ga、富Cr,在判别图右上方;高钛苦橄岩贫Cr、富Zr和Ga,在判别图左下方;低钛苦橄岩位于二者之间。

图2-E为 $\lg(\text{MgO}/\text{Ga})-\lg(\text{Sc}/\text{Zr})$,科马提岩富MgO、贫Ga,在判别图右方;高钛苦橄岩富Ga、贫MgO,且Sc/Zr的值明显小于科马提岩和低钛苦橄岩,在判别图左下方;低钛苦橄岩在判别图左上方。

图2-F为 $\lg(\text{Cr}/\text{Zr})-\lg(\text{Ni}/\text{Ga})$,科马提岩富Ni和Cr、贫Ga和Zr,在判别图右上方;低钛苦橄岩和高钛苦橄岩Ni/Ga值接近,但后者富Zr、贫Cr,因此高钛苦橄岩在判别图中偏左,低钛苦橄岩居中。

3 晚古生代“科马提岩”样品投图结果

3.1 样品收集及处理

数据库中记载的25个晚古生代科马提岩数据包括越南的11个^[18]、印度东部地区10个^[21]及印度拉达克4个^[20]。本次研究将上述晚古生代“科马提岩”数据整理成.xlsx格式,对应等密度判别图(图2)坐标轴挑选元素,计算元素比值并对比值取对数,以对数值为坐标轴,用Microsoft Excel绘制样品散点图,最后用CorelDRAW将散点图与对应的等密度判别图叠合(图2),样品投图完成。

3.2 样品投图结果

(1)越南地区的样品缺少Ga数据,仅投在 $\text{TiO}_2/\text{Sc}-\text{Na}_2\text{O}/\text{Ni}$ (图2-A)和 $\text{TiO}_2/\text{Na}_2\text{O}-\text{TiO}_2/\text{Sc}$ (图2-C)判别图中,图中7个样品点落在低钛苦橄岩区,2个样品点落在科马提岩与低钛苦橄岩的交叠区,1个样品点落在科马提岩区,落在科马提岩区的样品 Na_2O 含量明显偏低。

(2)印度东部地区10个样品点的投影位置相对

集中,全部落在判别图中的苦橄岩区, $\text{MnO}/\text{Zr}-\text{Cr}/\text{Ga}$ (图2-D)判别图中投在高钛苦橄岩一侧, $\text{Ni}/\text{Ga}-\text{Cr}/\text{Zr}$ (图2-F)和 $\text{Cr}/\text{Zr}-\text{Ni}/\text{Ga}$ (图2-E)判别图中投在低钛苦橄岩和高钛苦橄岩交叠区,其他图中均在低钛苦橄岩。

(3)印度拉达克的4个样品基本全部投在等密度判别图的低钛苦橄岩与科马提岩的交叠区,但总体更偏向于低钛苦橄岩区。

4 讨论

4.1 科马提岩与苦橄岩的特征及区别

科马提岩具鬣刺结构,鬣刺主要由骸晶结构的橄榄石组成;苦橄岩常为斑状结构,斑晶主要为不具骸晶结构的橄榄石,再者苦橄岩的淬火骸晶结构主要由辉石组成,而非橄榄石。科马提岩岩浆快速上升或上升通道周围热量充足,岩浆在上升期间橄榄石未结晶,喷出地表后才快速冷凝结晶;苦橄岩岩浆上升期间橄榄石可能已结晶,上升的岩浆喷出地表时裹挟着橄榄石晶体,有些苦橄岩中的橄榄石斑晶含量少,有些含量多,显微观察薄片发现某些苦橄岩中橄榄石斑晶含量大于50%,这与原始岩浆特征不符,说明一部分或大部分橄榄石属堆晶成因。

科马提岩成因与核心-地幔边界的高度熔融的炽热地幔流从地幔深处的热边界层上升有关^[3,17],是高压(>8GPa)、高温(1600°C)、MgO含量(30%)低于碱性的岩浆在形成深度高度部分熔融(>40%)的产物^[1],还有学者认为其形成温度大于1650°C^[3]。一些岛弧环境中较浅的地幔熔融形成的科马提岩与太古宙DMM物质等同^[22],源自亏损地幔源区的科马提岩中LREE亏损,高场强元素较富集。苦橄岩可作为地幔柱尾柱的标志^[23],成矿物质部分直接来源于地幔柱,部分为岩石圈混入物,主要来源为岩石圈地幔^[15]。苦橄岩与板内洋岛玄武岩(OIB)模式相似,有些不相容元素较OIB富集^[24-26]。苦橄岩多形成于与地幔柱活动有关的大陆或大洋溢流玄武岩区,如中国的峨眉山玄武岩省;少量形成于与俯冲有关的岛弧环境,如加拿大大不列颠Kamloops地区^[27]。苦橄岩呈现地幔柱玄武岩的特征,也许是构造背景与源区的不同,不同区域苦橄岩的元素含量存在差异。总体上,苦橄岩主要形成于地幔柱环境^[24,28-30]。科马提岩、科马提质玄武岩和苦橄岩依次代表上升的地幔岩浆的不同部分^[31],不论科马提岩

岩浆起源为何,随着时间的推移都会逐渐被富含不相容元素的苦橄岩岩浆代替,而原始岩浆也更加多变^[32]。

苦橄岩和科马提岩都是高镁岩石(MgO 含量 18%~34%),苦橄岩相对富 TiO₂,玻安岩中 TiO₂ 最贫^[33],苦橄岩、科马提岩、玻安岩中的 Al₂O₃/TiO₂ 值依次增高(图 3)。罗应等^[17]研究发现,苦橄岩和科马提岩的成分存在差异:主量元素上,科马提岩中 MgO 含量明显高于苦橄岩, TiO₂、K₂O、Na₂O 和 P₂O₅ 含量明显亏损;微量元素上,科马提岩富集相容元素 Cr、Co 和 Ni,亏损其他几乎全部不相容元素,二者部分元素的含量差甚至超过一倍或一个数量级。

本次研究发现,太古宙科马提岩、后太古宙低钛和高钛苦橄岩的化学成分差异显著,三者 MgO 的平均含量分别为 29.77%、24.22%、17.38%,说明科马提岩更富镁,其他主量元素含量的高低顺序正好相反;微量元素 Cr、Ni、Cs、Pb、Co 和 Zn 在科马提岩中更富集,其次为低钛苦橄岩、高钛苦橄岩,而 Co、Zn 较特殊,高钛苦橄岩比低钛苦橄岩含量高,其余微量元素的含量由高至低依次为高钛苦橄岩、低钛苦橄岩、科马提岩;稀土元素的含量表现为高钛苦橄岩 > 低钛苦橄岩 > 科马提岩,前者比后者高出约 1 倍。主量、微量元素的含量主要表现为后太古宙高钛苦橄岩 > 后太古宙低钛苦橄岩 > 太古宙科马提岩,与 TiO₂ 平均含量高低顺序一致。科马提岩明显富集 Nb、Rb,亏损 Ta、Hf 及 Sr,其他元素差别不明显,总体略高于原始地幔含量;稀土元素趋于水平,比球粒陨石高 2~5 倍。低钛苦橄岩明显富集 Pr 和放射性元素 Th,亏损 Hf 和 Nb,略微亏损 Zr、Sc 和

Sr,比原始地幔含量高 1~10 倍;稀土元素比球粒陨石高 8~30 倍,轻稀土元素富集。高钛苦橄岩明显富集 Ta 和放射性元素 Th,略亏损 Rb、Pr、Hf 和 V,明显亏损 Y、Yb、Lu 和 Sc;轻稀土元素富集,稀土元素比球粒陨石高 9~60 倍。稀土元素 Pr 在低钛苦橄岩中富集,在高钛苦橄岩中亏损。苦橄岩总体上富集轻稀土,与大洋中脊玄武岩(MORB)相比差别明显^[26]。从苦橄岩中富集放射性元素 Pb 和 Th 推测,形成苦橄岩的高温环境中的部分热能,可能是放射性元素释放的蜕变能转化而来。

4.2 对晚古生代“科马提岩”的厘定

苦橄岩成分变化较大,某些富镁苦橄岩的成分与科马提岩接近,科马提岩、低钛苦橄岩和高钛苦橄岩样品点的分布界线并非截然,存在过渡区,但不同岩石样品点的等密度曲线(密度分别为 60%、70%和 80%)交叠率较小,界线清晰,因此等密度判别图可用来区分 3 类岩石。判别图结果、岩相学及地球化学特征综合研究,对重新厘定上述若干晚古生代“科马提岩”岩性具有重要意义。值得注意的是, Ga 是判别图中多次使用的重要元素,而越南样品缺少 Ga 的数据,使判别结果受限。

4.2.1 越南“科马提岩”样品

等密度判别图中,越南“科马提岩”样品点多投在低钛苦橄岩区,说明越南“科马提岩”可能为低钛苦橄岩。B6859 投在科马提岩区、P12/86 和 P9/86 投在科马提岩与低钛苦橄岩的交叠区,可能是 Na₂O 含量偏低所致(图 2-A、C,图 4)。

越南“科马提岩”可能是峨眉山玄武岩大火成岩省(ELIP)的东南延伸,因为二者形成时代较一致^[34-35,26]。但在云南丽江等地发现的却是与峨眉山玄武岩伴生的苦橄岩^[36]。那么,越南地区的岩石到底是科马提岩还是苦橄岩,需要深入研究。越南“科马提岩”和云南丽江苦橄岩岩相学特征相似,均为斑状结构,斑晶以富镁橄榄石为主,橄榄石多呈自形-半自形粒状,少量发生熔蚀,粒径小于 5mm;基质通常为全晶质,主要矿物为单斜辉石、斜长石和橄榄石,有时含微晶辉石和玻璃质;橄榄石常夹杂微小的铬尖晶石颗粒,部分铬尖晶石颗粒分布在基质中;岩石中的橄榄石蛇纹石化强烈,与地幔橄榄石不同的是,未发生扭折变形^[18,36]。具玻璃包体,缺少扭折结构,说明岩石中的橄榄石晶粒不是捕虏于地幔,而是岩浆结晶的产物^[36];呈斑状结构,而非

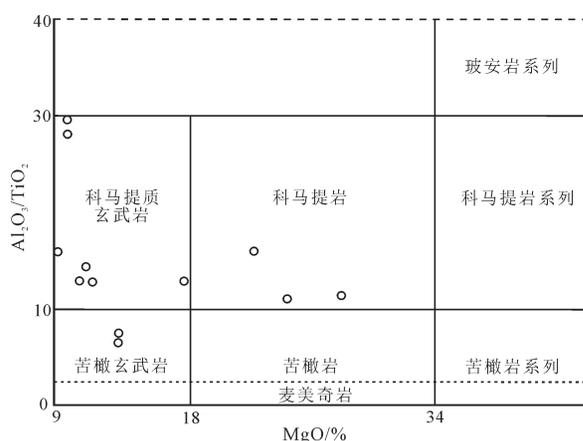


图 3 超镁铁质火山岩判别图(底图据参考文献[33],

图中资料来源参考文献[37])

Fig. 3 Discriminant diagram for ultrabasic volcanic rocks

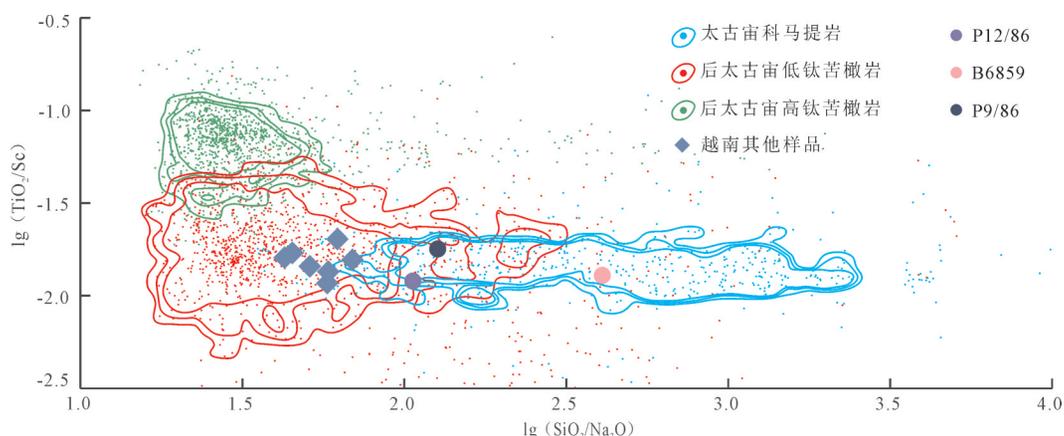


图4 越南地区“科马提岩”样品投影图

Fig. 4 Projection of komatiites samples in Vietnam

鬣刺结构,橄榄石还不是骸晶,均说明该类岩石应该是苦橄岩。

越南岩石样品 MgO 含量偏高(22%~23%,平均值 21.61%),代表其母岩浆较富镁^[18],与3类岩石的 MgO 平均含量对比发现,太古宙科马提岩(29.77%)明显偏高,后太古宙高钛苦橄岩(17.38%)明显偏低,后太古宙低钛苦橄岩(24.22%)近似,说明越南“科马提岩”更近似于低钛苦橄岩。该区“科马提岩”的 K_2O 、 P_2O_5 平均含量与太古宙科马提岩相似; Ti 含量偏高是峨眉山玄武岩地幔柱成因特征,与科马提岩不在同一岩浆系列;稀土元素总量低、LREE 亏损^[18],这与科马提岩相似,却不同于峨眉山玄武岩和苦橄岩(图5),其他主量、微量元素含量与低钛苦橄岩相似。

上述研究表明,越南宋达地区发现的为似科马提岩的低钛苦橄岩。

4.2.2 印度东部“科马提岩”样品的厘定

印度东部“科马提岩”样品点全部投在判别图的苦橄岩区,且 TiO_2 平均含量 1.41%,说明其为高钛苦橄岩。样品点投在图 2-A、图 2-B、图 2-C 的低钛苦橄岩区,是因为其 MgO 和 Sc 含量明显偏高。

岩相学方面,该区“科马提岩”呈鬣刺或堆晶结构,其中,具残余鬣刺结构的橄榄石晶粒嵌于由斜方辉石、单斜辉石和铬铁矿构成的基质中,说明岩浆结晶作用发生在熔体极大程度快速冷凝的环境,晶体成核率低、结晶速度快,岩石含自形的绿色镁铁尖晶石,却未见斜长石便是绝佳证据;呈堆晶结构的,堆晶矿物主要为橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和铬铁矿,橄榄石多为边缘或裂隙遭受蛇纹石化的新鲜等

轴状颗粒,单斜辉石呈针状,斜方辉石常被普通辉石包围,矿物组成上属二辉橄榄岩^[21]。堆晶结构、由非骸晶橄榄石构成的鬣刺结构及岩石形成所需的快速上升、冷凝的环境,这些都是苦橄岩的特征。

地球化学方面,较太古宙科马提岩,印度东部“科马提岩” TiO_2 、 K_2O 、 MgO 、 P_2O_5 的平均含量高,微量元素 Cr 和 Ni 明显亏损, Co 和 Nb 略亏损,其他元素显著富集,整体高出 1~14 倍, Rb 较特殊,高出约 86.14 倍;较后太古宙高钛苦橄岩, TiO_2 (高钛苦橄岩为 1.94%,印度东部样品为 1.29%~1.54%、平均值 1.41%)和微量元素中 Co 、 Cu 、 Ba 、 Hf 、 U 及稀土元素的含量二者均相似,其他元素间差异也更小,即印度东部“科马提岩”与高钛苦橄岩地球化学特征更近似。

综上所述,印度东部“科马提岩”样品更像是高钛苦橄岩。

4.2.3 印度拉达克“科马提岩”样品的厘定

拉达克“科马提岩”样品点全部投在等密度判别图的低钛苦橄岩与科马提岩交叠区,但偏向低钛苦橄岩。该区高镁超基性岩主要由橄榄石组成,先结晶的橄榄石比后结晶的($Fo > 88%$)更富镁,新鲜橄榄石的核部 $Fo = 81\% \sim 84%$,橄榄石沿裂隙和边缘发生不同程度的蛇纹石、绿泥石等蚀变^[20],认为其为“科马提岩”的主要依据是地球化学等方面的特征,而非鬣刺结构、橄榄石骸晶等岩相学特征。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 1-A)中,拉达克样品的微量元素含量较高钛苦橄岩偏低,较科马提岩偏高,与低钛苦橄岩近似; Nb 、 Sc 和 Sr 在拉达克的样

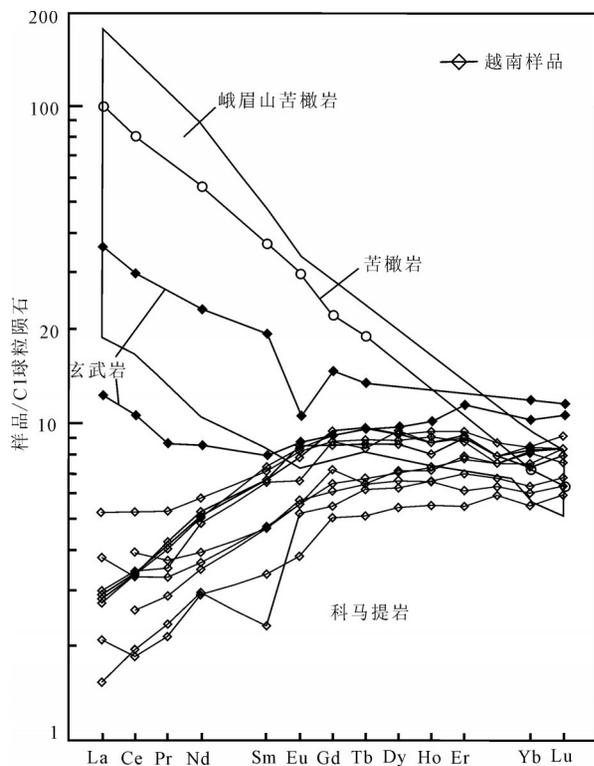


图5 越南样品与峨眉山玄武岩和苦橄岩稀土元素配分型式对比图^[38]

Fig. 5 Comparison of REE between Vietnamese samples and Mount Emei basalt and picrites

品和低钛苦橄岩中均亏损,曲线走势二者也更相似。在稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(图1-B)中,拉达克样品的轻稀土元素富集,除略亏损Gd、不富集Pr外,其他元素含量及曲线走势与低钛苦橄岩基本一致。综上分析认为,印度拉达克“科马提岩”更偏向于低钛苦橄岩。

5 结论

(1)本文采用全数据模式通过对全球太古宙科马提岩、后太古宙高/低钛苦橄岩数据对比研究并绘制等密度判别图发现,科马提岩最富镁及微量元素Cr、Ni、Cs、Pb、Co、Zn,其次为低钛苦橄岩(除Co和Zn外),其他主量、微量元素的含量均表现为后太古宙高钛苦橄岩>后太古宙低钛苦橄岩>太古宙科马提岩,稀土元素的含量前者比后者高约1倍。以元素和元素比值间的明显差异(如Cr/Ga、MgO/Ga、MnO/Zr、Cr/Zr等)为基础,在MATLAB软件中利用等密度分布函数(Density Distribution)绘制的判别图,用于区

分科马提岩、低钛苦橄岩和高钛苦橄岩比较有效。

(2)利用等密度判别图结合岩相学和地球化学特征,重新厘定全球若干晚古生代“科马提岩”岩性发现:越南二叠纪“科马提岩”和印度拉达克地区的“科马提岩”更像是低钛苦橄岩,印度东部的“科马提岩”更像是高钛苦橄岩。

致谢:感谢中国地质调查局发展研究中心焦守涛博士和西北大学地质学系刘欣雨博士在写作过程中提供的热心帮助,以及审稿专家对本文提出的宝贵意见及建议。

参考文献

- [1]Herzberg C, O'Hara M J. Phase equilibrium constraints on the origin of basalts, picrites, and komatiites[J]. *Earth-Science Reviews*, 1998, 44(1): 39-79.
- [2]Depaolo D J. Crustal growth and mantle evolution— inferences from models of element transport and Nd and Sr isotopes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44(8): 1185-1196.
- [3]Campbell I H, Griffiths R W, Hill R E T. Melting in an Archean mantle plume: Heads its basalts, tails its komatiites[J]. *Nature*, 1989, 339(6227): 697-699.
- [4]Nisbet E G, Cheadle N T, Arndt M J, et al. Constraining the potential temperature of the Archean mantle: A review of the evidence from komatiites[J]. *Lithos*, 1993, 30(3/4): 291-307.
- [5]Bennett V C, Nutman A P, Esat T M. Constraints on mantle evolution from ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os isotopic compositions of Archean ultramafic rocks from southern west Greenland (3.8 Ga) and western Australia (3.46Ga)[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(14): 2615-2630.
- [6]Hanski E, Kamensky V S. Chrome spinel-hosted melt inclusions in Paleoproterozoic primitive volcanic rocks, northern Finland: Evidence for coexistence and mixing of komatiitic and picritic magmas[J]. *Chemical Geology*, 2013, 343(3): 25-37.
- [7]Kerr A C. La isla de Gorgona, Colombia: A petrological enigma?[J]. *Lithos*, 2005, 84(12): 77-101.
- [8]Kusky T M, Polat A. Growth of granite-greenstone terranes at convergent margins, and stabilization of Archean cratons[J]. *Tectonophysics*, 1999, 305(13): 43-73.
- [9]Atherton M, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 1993, 362(6416): 144-146.
- [10]Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution[J]. *Lithos*, 2005, 79(12): 1-24.
- [11]Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 19(2): 290-300.

- [12]Moyen J F, Laurent O. Archaean tectonic systems: A view from igneous rocks[J]. *Lithos*, 2018, 302/303: 99–125.
- [13]关志红, 项红莉, 朱意萍, 等. 澳大利亚伊尔岗克拉通科马提岩型镍矿成矿作用及找矿方法[J]. *地质通报*, 2014, 33(2/3): 238–246.
- [14]Anderson D L. A statistical test of the two–reservoir model for helium isotopes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 193(12): 77–82.
- [15]张招崇, 郝艳丽, 王福生. 大火成岩省中苦橄岩的研究意义[J]. *地学前缘* (中国地质大学,北京), 2003, 10(3): 105–114.
- [16]姜常义, 钱壮志, 姜寒冰, 等. 云南宾川–永胜–丽江地区低钛玄武岩和苦橄岩的岩石成因与源区性质[J]. *岩石学报*, 2007, 23(4): 777–792.
- [17]罗应, 袁方林, 金维浚, 等. 全球苦橄岩与太古宙科马提岩对比: 全数据模式的启示 [J]. *地质科学*, 2018, 53(4): 1267–1284.
- [18]Hanski E, Walker R J, Huhma H, et al. Origin of the Permian–Triassic komatiites, northwestern Vietnam[J]. *Contrib Mineral Petrol.*, 2004, 147: 453–469.
- [19]Basilios T, Georgia P P I, David J W P, et al. Triassic rift–related komatiite, picrate and basalt, Pelagonian continental margin, Greece[J]. *Lithos*, 2008, 104: 199–215.
- [20]Rao R, Rai H. Permian komatiites and associated basalts from the marine sediments of Chhongtash Formation, southeast Karakoram, Ladakh, India[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2007, 91: 171–189.
- [21]Prasad J, Bhattacharya D K. Geochemical Constraints on Cumulate Textured Ti–rich Al–depleted Komatiites from Chotanagpur Gneissic Complex, Eastern India[J]. *Journal Geological Society of India*, 2016, (87): 429–438.
- [22]Parman S W, Grove T L, Dann J C. The production of Barberton komatiites in an Archean subduction zone[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, 28: 2513–2516.
- [23]Richards M A, Duncan R A, Courtillot V E. Flood–basalts and hot spot tracks: Plume heads and tails[J]. *Science*, 1989, 246: 103–107.
- [24]Burke K. The geology of continental margins[J]. *The Journal of Geology*, 1976, 84(4): 499–500.
- [25]赵海玲, 狄永军, 刘振文, 等. 东南沿海地区新生代火山作用和地幔柱[J]. *地质学报*, 2004, 78(6): 781–788.
- [26]张招崇, 闫升好, 陈柏林, 等. 阿尔泰造山带南缘中泥盆世苦橄岩及其大地构造和岩石学意义[J]. *地球科学* (中国地质大学学报), 2005, 30(3): 289–297.
- [27]桑隆康, 马昌前. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 141–142.
- [28]Anderson D L. Komatiites and picrites: Evidence that the ‘plume’ source is depleted[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 128(34): 303–311.
- [29]Gibson S A. Major element heterogeneity in Archean to recent mantle plume starting–heads[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 195(1): 59–74.
- [30]Polat A. The geochemistry of Neoproterozoic (ca.2700 Ma) tholeiitic basalts, transitional to alkaline basalts, and gabbros, Wawa Subprovinc, Canada; Implication for petrogenetic and geodynamic processes[J]. *Precambrian Research*, 2009, 168(12): 83–105.
- [31]Arndt N T, Leshar C M, Barnes S J. Komatiite[M]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2008: 1–467.
- [32]Campbell I H, Griffiths R W. The changing nature of mantle hotspots through time; implications for the chemical evolution of the mantle[J]. *Geology*, 1992, 100: 497–523.
- [33]Mishkin M A, Vovna G M, Lennikov A M, et al. The lower crustal early Proterozoic metabasite–enderbite association of the Dzhugdzhur block (Aldan Shield): Its nature and origin of protoliths[J]. *Doklady Earth Sciences*, 2007, 412(1): 43–48.
- [34]Chung S L, Lee T Y, Lo C H, et al. Intraplate extension prior to continental extrusion along the Ailao Shan–Red River shear zone[J]. *Geology*, 1997, 25: 311–314.
- [35]Chung S L, Jahn B M, Genyao W, et al. The Emeishan Flood Basalt in SW China: A mantle plume initiation model and its connection with continental breakup and mass extinction at the Permian–Triassic boundary[C]//Flower M F J, Chung S L, Lo C H, et al. Mantledynamics and plate tectonics in East Asia. AGU Geodynamics Series, 1998, 27: 47–58.
- [36]张招崇, Mahoney J, 王福生, 等. 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[J]. *岩石学报*, 2006, 22(6): 1538–1552.
- [37]Kulikov V S, Kulikova V V. “A new approach to the classification of high–magnesian rocks” [C]//Proceedings of the 2nd All–Russia Petrographic conference, Syktyvkar, 2000, 1: 111–112.
- [38]Chung S L, Jahn B M. Plume–lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian–Triassic boundary[J]. *Geology*, 1995, 23: 889–892.