

文章编号: 1000-6524(2003)01-0011-09

西秦岭礼县地区新生代钾霞橄黄长岩系地球化学特征及地质意义

王建, 李建平

(中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

摘要: 西秦岭礼县地区新生代钾霞橄黄长岩系具有贫 SiO_2 、 Al_2O_3 , 富 MgO 、 CaO 、 TiO_2 及 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 的特征, 矿物组合中除橄榄石、透辉石外, 普遍含有霞石/钾霞石、黄长石/白榴石和钛金云母等矿物。火山岩系的 Sr、Nd 示踪同位素和微量元素特征显示其与洋岛玄武岩(OIB)的地球化学体制相似, 源区具有由软流圈流体交代导致的 EM I 型地幔端员成分。根据尖晶石相二辉橄榄岩地幔包体温度、压力条件估算, 结合区域地球物理资料和区域大地构造环境以及火山岩的形成时代推断, 钾霞橄黄长岩系的形成机制与本地区新生代岩石圈伸展作用密切相关, 原始岩浆源于 > 92 km 的岩石圈底部热边界层的低度部分熔融。

关键词: 新生代; 钾霞橄黄长岩系; 幔源包体; 地球化学; 地质意义; 礼县; 西秦岭

中图分类号: P588.15; P59

文献标识码: A

Geochemical characteristics and geological implications of the Cenozoic kamafugites from Lixian County, West Qinling

WANG Jian and LI Jianping

(Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640, China)

Abstract: The Cenozoic kamafugites in Lixian County of West Qinling are poor in SiO_2 and Al_2O_3 but rich in MgO , CaO , TiO_2 and $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$. The modal mineral assemblage is composed mainly of olivine, clinopyroxene, nepheline/kalsilite, melilite/leucite and Ti-phlogopite. The trace isotopic compositions of Sr, Nd and trace element characteristics of kamafugitic series show distinct geochemical features similar to those of N_OIB and MORB as well as an EM I end member caused by metasomatism of asthenospheric fluids. Based on the estimation results of p and T from lherzolites, regional geophysical information, regional tectonic settings and the formation ages of volcanic rocks, it is held that the formation of kamafugitic series was closely related to the Cenozoic lithospheric extension in this area, and that the primitive kamafugitic magma was derived from the low-degree partial melting of the thermal boundary layer at the basement of lithosphere beneath the depth of 92 km.

Key words: Cenozoic; kamafugites; mantle-derived xenoliths; geochemistry; geological implication; Lixian County, West Qinling

钾霞橄黄长岩系是一套含钾霞石的成因上相互关联的火山岩系 (Woolley *et al.*, 1996; 王建等, 2002)。西秦岭礼县是国内仅见的钾霞橄黄长质火

山岩系产区, 其若干组成岩筒在时间和空间上有着密切的联系。最近, 有学者 (喻学惠等, 2001a, 2001b) 报道了该套岩系的同位素地球化学特征, 并

收稿日期: 2002-02-49; 修订日期: 2002-06-27

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1998040800); 中国科学院知识创新工程重点资助项目(KZ CX2-SW-117)

作者简介: 王建(1964-), 男, 博士, 工程师, 主要从事矿物学、岩石学和地球化学研究。

估算了岩系中石榴石二辉橄榄岩和石榴石二辉石岩包体的温度、压力条件,笔者此前也对该岩系的构造背景、岩相特征及其中的单斜辉石矿物化学做了一定的研究(王建等,2002),在此基础上,本文拟从寄主岩的元素地球化学特征和估算尖晶石二辉橄榄岩包体形成条件入手,借助已有的Sr、Nd同位素资料探讨该火山岩系原始岩浆的起源深度、地幔源区性质及其与区域构造环境演化的关系。

1 岩石地球化学特征

钾霞橄黄长岩系由数十个火山岩筒(或岩管)组成。本次研究样品取自上、下分水岭、苟家山、红崖山、水晶坝、上杜家、百草山、王家坪和硬坪9个岩筒(王建等,2002)。岩石样品经破碎后用稀HCl浸泡,而后经清水超声波漂洗,蒸干后碎至200目。主量元素分析在中国科学院广州地球化学研究所用普通湿法完成,微量元素测试在澳大利亚国立大学地球科学研究所的Laser Ablation 7500 ICP-MS系统上完成,方法如下:用25%的LiBO₄助熔剂通Ar条件下熔化样品淬火成均质玻璃体,而后用环氧树脂封存。取NIST612为外标,Ca(⁴³Ca)为内标,同时测定BCR以保证结果的可信度。大部分微量元素采用65 μm激光束直径和5 Hz震动频率测定,微量元素

同位素(NIST玻璃和样品)信号均由脉动模式获得。质量分数大于80的元素分析精度优于1% RSD,质量分数小于80的元素分析精度在1%~4% RSD之间。分析流程参见Eggins等(1997)。所有矿物成分测试均在澳大利亚国立大学地球科学研究所Cameca SX50型电子探针上完成,加速电压15 kV,束电流10 nA,束直径1 μm。

1.1 主量元素地球化学

火山岩全岩化学成分贫SiO₂、Al₂O₃,富MgO、CaO、TiO₂和Na₂O+K₂O,属于钾质系列火山岩,标准矿物中普遍含霞石和/或白榴石(表1)。在火山岩的硅-碱分类图上,本区火山岩落入副长石质岩区;在Foley等(1987)的超钾质火山岩分类图解(图略)中,本区火山岩落入钾霞橄黄长岩区(Group II, Kamafugites)。

1.2 微量元素地球化学

稀土元素的球粒陨石标准化配分型式如图1所示。由表2和图1可知,该岩系显著富集轻稀土元素,各火山岩筒的稀土元素分配型式呈近于平行的右倾负斜率曲线,反映LREE富集程度的(La/Yb)_n值为40.31~53.51,ΣREE为393.04~576.48(μg/g),不显Eu的负异常,与洋岛玄武岩(OIB)的稀土元素型式(Sun and McDonough, 1989)相近。岩系的LREE富集程度明显高于中国东部新生代含

表1 西秦岭礼县新生代钾霞橄黄长岩系代表性样品的全岩化学成分

w_B/%

Table 1 Chemical compositions of the typical Cenozoic kamafugites samples from Lixian County, West Qinling

样号	BCS1	YP1	WJP1	SDJ	HYS1	SJB	FSL2	FSLx	GJS
SiO ₂	41.86	39.8	38.58	39.93	39.96	39.69	39.51	38.02	41.95
TiO ₂	3.62	2.79	3.35	3.28	2.73	3.48	2.82	2.85	3.12
Al ₂ O ₃	9.04	8.84	7.93	7.24	6.88	8.2	7.02	6.03	8.09
Fe ₂ O ₃	7.4	6.05	7.44	9.41	7.29	7.49	5.54	6.54	8.03
FeO	5.04	5.94	4.87	4.33	5.09	5.67	5.2	6.19	4.44
MnO	0.17	0.16	0.14	0.17	0.15	0.16	0.17	0.17	0.17
MgO	8.42	12.71	11.36	12.27	13.53	9.93	16.67	16.62	12.22
CaO	12.82	14.23	15.07	13.8	14.59	14.79	13.33	14.53	14.26
Na ₂ O	3.85	3.31	3.85	2.58	3.09	3.3	1.67	1.43	1.66
K ₂ O	1.12	3.02	3.01	1.9	2.14	2.43	1.08	1.66	0.16
H ₂ O ⁺	4.62	1.29	2.33	3.9	2.59	2.75	4.42	4.51	4.3
P ₂ O ₅	1.56	1.38	1.47	1.12	1.09	0.98	1.47	1.11	0.87
烧失量			0.18		0.75	0.71	0.94		0.21
总量	99.52	99.52	99.58	99.93	99.88	99.58	99.84	99.66	99.48
标准矿物									
Ne	11.42	15.42	0	12.28	0	15.73	8.07	6.89	0.34
Lc	0	14.26	14.39	7.04	10.26	11.74	0.2	8.1	0
Ac	0	0	22.12	0	21.8	0	0	0	0
Ns	0	0	1.96	0	0.55	0	0	0	0

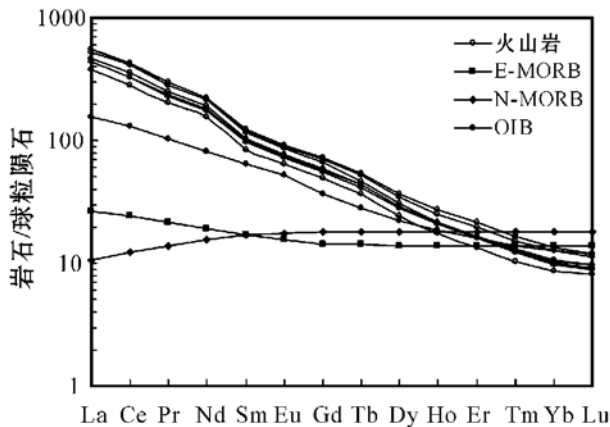


图 1 钾霞橄黄长岩系稀土元素分配模型
(据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 1 Chondrite-normalized REE patterns of kamafugites

上地幔包体的碱性玄武岩(刘丛强等, 1995), 低于钾镁煌斑岩和金伯利岩, 但与青藏高原北缘新生代钾玄质火山岩相近(邓万明, 1991)。

从火山岩系不相容元素原始地幔标准化后的蛛网图(图 2)来看, 岩系富集大离子亲石元素 LILE(如 Rb、Ba、Sr、K、Th)、轻稀土元素(如 La、Ce、Nd、Sm)以及高场强元素(如 Nb、Ta、Hf、P、Zr)。其中 Sr、Ba、Th、Nb、Ta、Zr 的含量(表 2)远高于中国东部新生代碱性玄武岩(刘丛强等, 1995), 也高于滇西和青藏高原北缘新生代钾玄质火山岩中相应元素含量(邓万明, 1991), 与洋岛玄武岩(OIB)不相容元素分布特征相似(Sun and McDonough, 1989), 尤其是 Hf、Ti、Y、Yb 的含量完全与 OIB 重合。与岛弧玄武

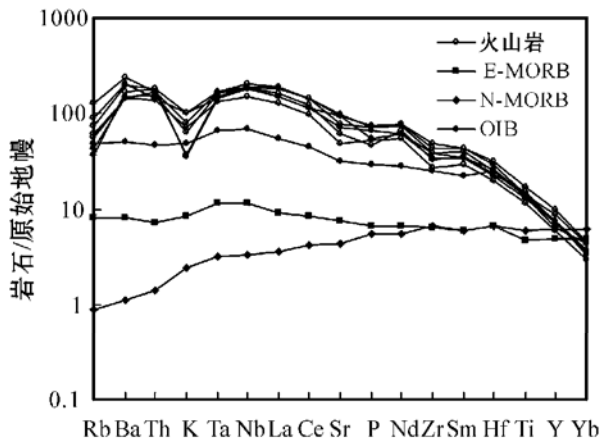


图 2 钾霞橄黄长岩系不相容元素蛛网图(据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 2 Primary mantle-normalized patterns for the incompatible elements from kamafugites

岩(Sun and McDonough, 1989)相比, 本区火山岩具有亏损 K 而富集 Nb、Ta 和 Ti 的特征, 表明本区火山岩系的地幔源区与岛弧火山岩的富集地幔源区形成机制有所不同。过渡族元素(Fe、Co、Ni、Cu、Sc、V、Cr、Mn 等)通常具有与 REE 和不相容元素完全不同的地球化学学习性, 在地幔部分熔融生成玄武岩浆时, 趋于保存在地幔残留矿物相中。但本地区火山岩系 Cr、Co、Ni 和 V 等的含量(表 2)均高于大洋中脊玄武岩和岛弧火山岩(Sun and McDonough, 1989)。这一方面也可能说明橄榄石等矿物的分离结晶程度较低, 即具有接近原始岩浆的性质; 另一方面, 可能与寄主岩样品中混有一些无法挑出的地幔捕虏微晶矿物(橄榄石、尖晶石、Cr-透辉石和钛铁矿等)有关。相容元素和不相容元素的分布特征指示本地区火山岩是从较低地幔部分熔融程度的富集地幔源区产生的, 具有原始岩浆的性质。

1.3 Nb/Ta 值特征及含义

Nb 和 Ta 是具有相同电荷(5^+)和几乎无法分辨离子半径(0.64 \AA)的高场强元素。元素在大多数岩浆过程中(如分离结晶或部分熔融)的分布由电荷和离子半径控制(Bau, 1996), 并且大部分镁铁质-中性岩石具有球粒陨石的 Nb/Ta (17.57) 值, 如 N-MORB(17.66)、E-MORB(17.65)和 OIB(17.85)(Sun and McDonough, 1989)。本区火山岩系不同于一般的 OIB 和 MORB, 具有异常高的 Nb(105.10 ~ 146.13 $\mu\text{g/g}$)、Ta(5.395 ~ 6.943 $\mu\text{g/g}$)含量和 Nb/Ta 值(19.27 ~ 22.38), 暗示岩浆源区特殊的地球化学属性。实验研究表明(Green, 1995; Munker, 1998), 没有证据显示亏损的残留上地幔能够产生高 Nb/Ta 值。Kamber 等(2000)认为, 使具有相同电荷和离子半径的元素发生分离最可能的机制就是在水流体相条件下发生化学络合作用, 因为络合作用强烈受到元素电子构型(Nb 和 Ta 不同)和络合键的影响(Bau, 1996)。显然水化大洋板片的消减是实现这种分馏的最理想和可能的机制, 下述几点事实进一步证实了这种可能性: ①该过程能产生大量水流体带入地幔使之发生非由电荷和离子半径控制的元素分馏; ②岛弧岩浆在不相容元素蛛网图展示 Nb(和 Ti)负异常; ③镁铁质高压变质岩在进变质过程中形成低 Nb/Ta 值的分异脉和高 Nb/Ta 值的残留围岩; ④由火山岩带到地表的地幔榴辉岩普遍具有高 Nb/Ta 值。据此可以推断这种俯冲洋壳板片随着俯冲深度的增加逐渐脱水, 最后具有高 Nb/Ta 值

表2 西秦岭礼县新生代钾霞橄黄长岩系代表性样品微量元素分析结果

 $w_B/10^{-6}$

Table 2 Analytical results of the typical Cenozoic kamafugites samples from Lixian County, West Qinling

样号	BCS1	YP1	WJP1	SDJ	HYS1	SJB	FSL2
Sc	20.86	22.33	22.01	21.76	21.19	20.97	19.41
Ti	21710.52	16951.85	18322.05	18232.74	15155.34	19805.55	17179.48
V	227.37	243.66	240.17	247.48	200.42	254.43	175.89
Cr	346.18	824.92	413.09	490.92	543.07	359.65	792.26
Co	27.60	19.21	17.25	56.22	52.96	48.69	63.28
Ni	128.32	160.09	78.11	379.38	410.23	224.97	611.51
Cu	18.02	28.24	30.44	46.05	54.25	32.08	86.69
Ga	23.49	17.36	19.66	18.69	15.44	18.19	17.56
Rb	79.45	56.24	47.52	26.79	35.35	38.23	23.37
Sr	1943.09	1527.72	2070.55	2007.34	1009.81	1266.66	1598.72
Y	43.96	32.83	40.31	33.39	26.90	32.10	33.87
Zr	533.45	386.02	484.44	424.88	301.12	370.22	425.72
Nb	134.82	130.86	146.13	131.84	105.10	133.80	133.33
Sn	2.12	1.38	1.97	2.66	2.09	2.63	2.57
Cs	1.14	0.42	0.41	0.83	0.26	0.46	0.23
Ba	1647.99	1438.63	1389.55	1047.34	1003.40	1005.00	1172.12
La	129.64	103.56	130.33	102.38	88.69	110.24	123.50
Ce	254.92	199.74	256.80	200.80	173.21	219.79	251.15
Pr	28.12	21.98	28.25	22.33	19.28	23.56	27.02
Nd	104.58	81.68	104.43	83.40	72.11	88.42	101.07
Sm	19.25	14.99	18.73	15.34	13.11	15.75	17.90
Eu	5.37	4.20	5.22	4.31	3.77	4.49	4.97
Gd	15.05	11.55	14.40	11.81	10.22	12.21	13.45
Tb	2.02	1.56	1.94	1.62	1.38	1.64	1.76
Dy	9.42	7.12	8.86	7.26	6.11	7.31	7.72
Ho	1.53	1.17	1.43	1.21	1.00	1.18	1.22
Er	3.52	2.68	3.29	2.74	2.23	2.63	2.68
Tm	0.42	0.33	0.39	0.33	0.26	0.32	0.31
Yb	2.26	1.77	2.13	1.82	1.45	1.71	1.66
Lu	0.30	0.24	0.29	0.25	0.21	0.24	0.22
Σ REE	576.39	452.58	576.48	455.58	393.04	489.49	554.63
Hf	9.59	6.95	8.84	7.89	6.15	7.20	7.74
Ta	6.02	5.98	6.90	6.58	5.40	6.94	5.99
Pb	3.73	2.83	0.53	2.14	4.15	6.88	7.37
Th	14.33	12.32	15.60	12.98	11.68	14.40	15.15
U	2.19	2.73	3.46	2.94	1.93	2.44	3.17
La/Nb	0.96	0.79	0.89	0.78	0.84	0.82	0.93
Ba/Nb	12.22	10.99	9.51	7.94	9.55	7.51	8.79
Rb/Ba	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.02
La/Ba	0.08	0.07	0.09	0.10	0.09	0.11	0.11
Ba/U	752.56	526.25	401.54	356.06	519.33	411.99	370.19
Th/U	6.54	4.51	4.51	4.41	6.04	5.90	4.79
U/Nb	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Nb/Ta	22.38	21.87	21.17	20.04	19.48	19.27	22.27
Nb/Th	9.41	10.62	9.37	10.16	9.00	9.29	8.80

的残留物穿过岩石圈底界进入软流圈地幔,进而影响软流圈地幔的地球化学性质。也就是说,本地区火山岩的高 Nb/Ta 值源区与俯冲洋壳物质介入软流圈地幔有关。

2 岩浆源区特征及构造环境讨论

2.1 岩浆起源深度估算

本次研究所涉及的9个火山岩筒中的包体均为

尖晶石相二辉橄榄岩地幔包体(未见石榴石相二辉橄榄岩), 岩石普遍由 4 种平衡矿物相组成, 即橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和尖晶石。本文选择了 4 个典型尖晶石二辉橄榄岩包体作为研究对象, 组成包体的代表性矿物的探针分析结果见表 3。应用 Mercier(1980)、Brey & Kohler(1990)、Wells(1977)、

Wood & Bano(1973) 和 Sachtleben & Seck(1981) 等矿物温压计计算了尖晶石二辉橄榄岩包体的平衡温压条件, 结果(表 4)表明, 由 Mercier(1980) 温压计两种辉石计算的分水岭岩筒的尖晶石二辉橄榄岩包体 [fsl3(1)、fsl4] 的形成温压条件较高 ($p = 2.287 \sim 2.917$ GPa, $t = 1100.3 \sim 1196$ °C), 百草山和红崖山

表 3 尖晶石二辉橄榄岩包体中代表性矿物探针分析结果 ($w_B/\%$) 及计算的阳离子数
Table 3 Microprobe analyses and calculated cations of typical minerals in lherzolite xenoliths

样品	Di				En			
	bcs	fsl3(1)	fsl4	hys1-2	bcs	fsl3(1)	fsl4	hys1-2
SiO ₂	52.40	52.14	53.45	53.07	56.15	56.15	55.80	55.73
TiO ₂	0.54	1.14	0.27	0.15	0.07	0.07	0.11	0.10
Al ₂ O ₃	6.70	2.78	4.75	3.35	3.57	2.99	3.32	3.18
FeO	2.36	4.31	3.42	2.84	6.41	5.63	6.06	5.48
Cr ₂ O ₃	0.68	0.53	1.04	1.18	0.19	0.69	0.52	0.87
MnO	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08
MgO	14.30	16.43	17.26	18.08	33.33	33.24	32.55	33.38
CaO	20.99	22.22	18.07	20.85	0.45	1.38	1.26	1.29
Na ₂ O	1.85	0.34	1.35	0.23	0.13	0.13	0.13	0.13
Total	99.90	99.97	99.69	99.84	100.39	100.36	99.83	100.24
以 6 个氧原子为基础								
TSi	1.893	1.907	1.929	1.925	1.928	1.930	1.932	1.916
TAl	0.107	0.093	0.071	0.075	0.072	0.070	0.068	0.084
M1Al	0.178	0.027	0.131	0.068	0.073	0.051	0.068	0.045
Al	0.285	0.120	0.202	0.143	0.145	0.121	0.136	0.129
M1Ti	0.015	0.031	0.007	0.004	0.002	0.002	0.003	0.003
M1Fe ³⁺	0.011	0.014	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000	0.020
M1Fe ²⁺	0.007	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
M1Cr	0.019	0.015	0.030	0.034	0.005	0.019	0.014	0.024
M1Mg	0.770	0.896	0.832	0.894	0.920	0.922	0.915	0.909
M2Mg	0.000	0.000	0.097	0.083	0.786	0.781	0.765	0.802
Mg	0.770	0.896	0.929	0.977	1.706	1.703	1.680	1.711
M2Fe ²⁺	0.054	0.101	0.103	0.086	0.184	0.155	0.175	0.138
M2Mn	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002
M2Ca	0.812	0.871	0.699	0.810	0.017	0.051	0.047	0.048
M2Na	0.130	0.024	0.094	0.016	0.009	0.009	0.009	0.009
Sum_cat	3.998	3.998	3.996	3.998	3.998	3.998	3.998	3.998
样品	Ol			Sp				
	bcs	fsl3(1)	fsl4	bcs	fsl3(1)	fsl4	hys1-2	
SiO ₂	41.22	41.06	40.93					
Al ₂ O ₃	0.08	0.08	0.08	58.98	52.92	58.87	29.19	
Cr ₂ O ₃	0.07	0.07	0.07	9.10	15.64	8.72	38.92	
FeO	9.97	9.14	9.69	10.88	9.61	9.74	14.26	
MnO	0.10	0.09	0.08					
MgO	49.04	49.70	49.03	21.35	19.99	21.73	17.05	
Total	100.48	100.14	99.88	100.31	98.16	99.06	99.42	
以 4 个氧原子为基础								
Si	1.002	0.998	1.000					
Al	0.002	0.002	0.002	1.773	1.651	1.780	1.008	
Fe ²⁺	0.203	0.186	0.198	0.232	0.213	0.209	0.350	
Cr	0.001	0.001	0.001	0.183	0.327	0.177	0.901	
Mn	0.002	0.002	0.002					
Mg	1.777	1.801	1.785	0.813	0.789	0.832	0.745	
Cations	2.987	2.990	2.988	3.001	2.980	2.998	3.004	
X _{Cr#} Sp				0.094	0.165	0.090	0.472	

注: Di—透辉石; En—顽火辉石; Ol—橄榄石; Sp—尖晶石; $X_{Cr\#} Sp = Cr/(Al + Cr)$ 。

表 4 礼县钾霞橄黄长岩系中尖晶石二辉橄榄岩包体温压条件估算
Table 4 p - T estimations of lherzolites from kamafugites of Lixian County

样号	Mercier (1980)				Brey & Kohler (1990)		Wells (1977)	Wood & Bano (1973)	Sachtleben & Seck (1981)	
	p_{En}/GPa	p_{Di}/GPa	$t_{En}/\text{°C}$	$t_{Di}/\text{°C}$	p_{lg}/GPa	$t_{lg}/\text{°C}$	$t/\text{°C}$	$t/\text{°C}$	$t/\text{°C}$	
bcs	1.894		968.8		1.894	968.8	897.3	848.1	961.6	943.2
fsl3(1)	2.323	2.250	1174.6	1026.0	2.287	1100.3	1187.5	983.6	1088.3	1160.9
fsl4	2.681	3.152	1159.3	1232.7	2.917	1196.0	1182.5	1134.0	1201.4	1138.4
hys1-2	1.703	2.427	1157.4	1152.5	2.065	1155.0	1135.9	1113.8	1204.4	1144.1

岩筒包体(bcs、hys1-2)的温压条件相对低(分别为 $p = 1.894 \text{ GPa}$ 、 $t = 968.8 \text{ °C}$ 和 $p = 2.065 \text{ GPa}$ 、 $t = 1154.95 \text{ °C}$)。用其他温度计验证显示,平衡温度误差均在 100 °C 之内,可见 Mercier(1980)温压计基本上反映了本地区包体的实际平衡条件。

由尖晶石二辉橄榄岩包体推算的温压条件下限($p = 2.917 \text{ GPa}$ 、 $t = 1196 \text{ °C}$)虽然大大超过中国东部新生代碱性玄武岩中五相共存的尖晶石/石榴石二辉橄榄岩捕虏体的平衡温压条件($t = 1039 \sim 1182 \text{ °C}$ 、 $p = 1.89 \sim 2.05 \text{ GPa}$) (樊祺诚等, 1997), 但并未超过公认的尖晶石相橄榄岩的稳定范围($2.5 \sim 3.0 \text{ GPa}$) (Gasparik, 1984), 这可能与本地区尖晶石二辉橄榄岩中尖晶石的 $\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$ 值较高有关, 因为尖晶石相-石榴石相二辉橄榄岩过渡相 CMAS - Cr_2O_3 系统实验研究证实, 当在 CMAS 系统中加入 Cr_2O_3 时, 则可使尖晶石的稳定压力大幅提高 (O'Neill, 1981)。另据最新报道(喻学惠等, 2001b), 在本研究区已发现石榴石二辉橄榄岩和石榴石二辉岩地幔包体, 它们的温度和压力范围分别为 $1172 \sim 1266 \text{ °C}$ 、 $2.9 \sim 3.6 \text{ GPa}$ 和 $1169 \sim 1248 \text{ °C}$ 、 $2.8 \sim 3.2 \text{ GPa}$, 均高于本文估算的尖晶石二辉橄榄岩的平衡条件, 可见本文对尖晶石二辉橄榄岩温压条件的估算是符合客观实际的。另外, 本地区的火山岩系普遍有碳酸岩呈细脉状、脉状和不规则状与之共生, 这种共生关系是钾霞橄黄长岩类和金伯利岩类的重要特征, 是深源岩浆的标志。在不考虑地壳增厚的情况下本区尖晶石二辉橄榄岩包体的最大埋深折算为 92 km , 考虑到青藏高原近双倍的地壳厚度, 所以岩浆的起源深度肯定 $> 92 \text{ km}$ 。

2.2 火山岩的地幔源区特征

目前, 除 Sr、Nd、Pb 同位素外, 微量元素或元素对比值特征已广泛用于解决火山岩成因、源区特征、古构造环境等地球动力学问题。本地区新生代的钾霞橄黄长岩系具有如下特点: ①大离子亲石元素和

高场强元素的比值 (LILE/HFSE), 如 Ba/Nb、Th/U、Rb/Ta 等值均高于正常洋岛玄武岩 (N_OIB), 显示火山岩源区具有 Dupal 异常特征; ②稀土元素和不相容元素分配模型显示富集地幔源区属性, 与洋岛玄武岩模型相近; ③火山岩系的强不相容元素对比值相关图解进一步确定了其与 OIB 的源区环境相似。与典型地区的 OIB 和 MORB 相比(刘从强等, 1995), 本地区火山岩的 Ba/Nb、La/Nb 值分别为 $7.51 \sim 12.22$ 和 $0.78 \sim 0.96$, 与萨摩亚和社会群岛大洋岛玄武岩重叠(图 3); Rb/Ba、La/Ba 值分别为 $0.02 \sim 0.048$ 和 $0.072 \sim 0.11$, 主要落到具有 EM I 端员特征的沃尔维斯洋脊玄武岩和具 EM II 端员特征的萨摩亚和社会群岛洋岛玄武岩成分区(图 4a); Ba/U、Th/U 值分别 $356 \sim 752$ 和 $4.41 \sim 6.54$, 与特里斯坦-达库尼亚岛玄武岩成分区重叠, 并与戈夫岛大洋岛玄武岩和 N_OIB 成分区接近(图 4b)。

目前, 对 EM I 的成因有不同的理解, 有人认为可能是受到软流圈流体作用的交代地幔 (Hart *et al.*, 1986), 也有人主张是智利型俯冲带下插的大洋壳遭到构造剥蚀作用形成的 (Dickin, 1995)。EM II 被普遍认为是俯冲和再循环的大陆壳物质与地幔岩发生混合作用的产物。不相容元素蛛网图、稀土元素的分配模型表明本区的钾霞橄黄长岩系源于富集型地幔源区。火山岩中较高的 Nb 含量 ($105 \sim 135 \mu\text{g/g}$)、不相容元素的蛛网图上无 Nb-Ta-Ti 亏损以及 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素组成特征 ($0.70412 \sim 0.70525$) (喻学惠, 2001b) 表明源区很少有陆壳物质的混入, 因而不可能是 EM II 型地幔源区; 加之 Ba/Nb、La/Nb 值与 N_OIB 和 E_MORB 的相似性, 进一步证明本区火山岩系为 EM I 型地幔源区, 形成 EM I 型地幔端员的流体可能来自软流圈。

与常见的具有 EM I 型地幔端员的火山岩相比, 本地区钾霞橄黄长岩系的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 同位素组成相对高 ($0.512768 \sim 0.512911$) (喻学惠, 2001a), 但

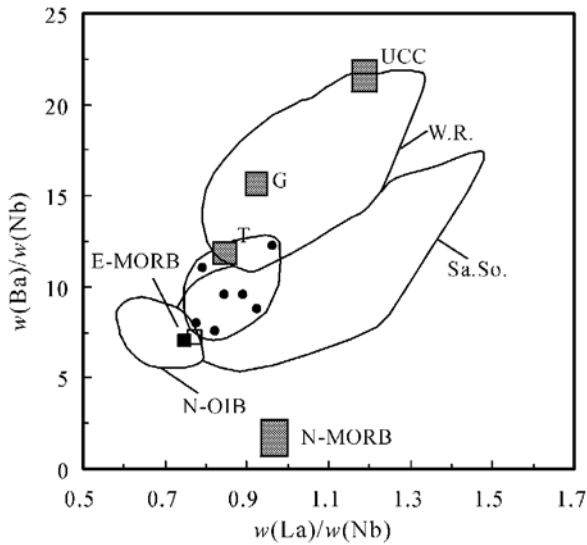


图 3 钾霞橄黄长岩系的 Ba/Nb- La/Nb 图解(据刘丛强等, 1995)

Fig. 3 Diagram of Ba/Nb- La/Nb for the kamafugites

⊗—本区火山岩筒成分点; UCC—上地壳; N_OIB—正常大洋岛玄武岩; N_MORB—正常洋中脊玄武岩; E_MORB—富集型洋中脊玄武岩; W. R. —沃尔维斯洋脊玄武岩; G 和 T—分别为戈夫岛和特里斯坦-达库尼亚大洋岛玄武岩; Sa. So—分别为萨摩亚群岛和社会群岛大洋岛玄武岩

⊗—volcanic pipes in the reserached area; UCC—upper continental crust; N_OIB—normal oceanic island basalt; N_MORB—normal mid_ocean ridge basalt; E_MORB—enriched mid_ocean ridge basalt; W. R. —Walvis ridge basalt; G and T—Gough and Tristan da Cunha Grp. oceanic island basalt; Sa. So. —Samoa Is. and Society Is. oceanic island basalt

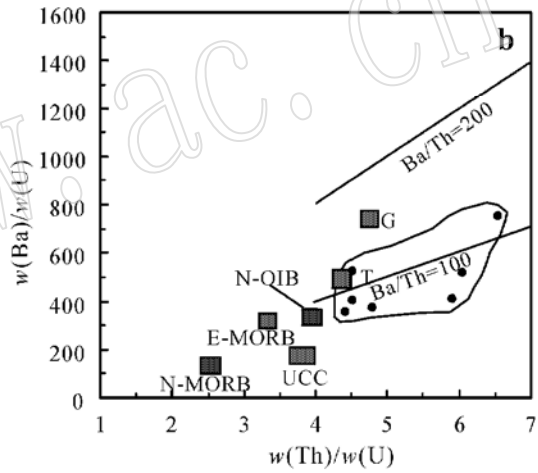
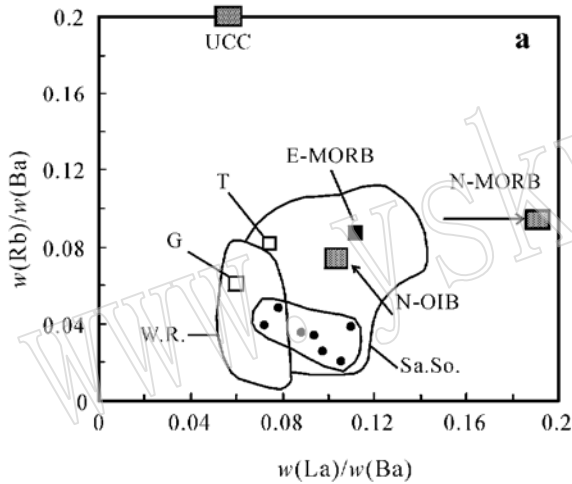


图 4 钾霞橄黄长岩系的 Rb/Ba- La/Ba 和 Ba/U- Th/U 图解

Fig. 4 Diagrams of Rb/Ba - La/Ba and Ba/U - Th/U for the kamafugitic series

图例同图 3

又低于软流圈流体所具有的亏损地幔同位素组成, 在¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd- ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 图解上, 火山岩系的成分点集中分布在 MORB 成分区右偏下的位置, 显示了弱亏损地幔源区特征, 这与沿滇西红河- 哀牢山走滑剪切带分布的高钾岩石的 EM II 特征明显不同(朱炳泉等, 1992; 张玉泉等, 1997), 可能是软流圈流体交代上覆岩石圈地幔, 在无陆壳物质混染的情况下形成不同富集程度的 EM I 型地幔所致, 也就是说岩石圈地幔的演化历史在一定程度上约束着本地区火山岩系的 Nd 同位素组成。

火山岩的高 Nb/Ta 值(19.27~ 22.38)意味着地幔源区遭受过高 Nb/Ta 值流体的交代, 也就是说交代流体的源区——软流圈地幔中混有俯冲洋壳的

组分。大洋板片的脱水作用可使 Ta 与 Nb 发生分馏, 该过程在脱挥发组分的早期阶段随着大部分流体相的释放而更加显著, 结果使得高压变质岩(榴辉岩)残留物中具有高 Nb/Ta 值。这种俯冲洋壳板片可穿过岩石圈底界进入软流圈地幔, 影响软流圈地幔的地球化学性质(Kamber, 2000)。由于俯冲板片具有近球粒陨石的 Sm/Nd 值, 因而并不显著影响亏损地幔的 Nd 同位素演化。

上述分析表明, 本地区的钾霞橄黄长岩系具有 EM I 型地幔源区, 这种富集源自富含 LILE、LREE 以及挥发组分(CO₂、CH₄等)的软流圈地幔和高 Nb/Ta 值的流体的交代作用。这种交代作用使得本地区火山岩系具有 OIB 型微量元素富集特征, 而流

体的软流圈来源又使得火山岩系的 Sr、Nd 同位素保留着亏损地幔的属性。

2.3 构造环境讨论

本地区钾霞橄黄长质火山岩系位于青藏高原东北缘, 扬子古陆、松潘- 甘孜褶皱带和祁连- 秦岭褶皱带交汇处; 而西秦岭本身经历了从古特提斯海到造山带的演化历史。根据地球物理资料, 本地区的岩石圈厚度仅 80~ 120 km (转引自喻学惠等, 2001a), 比周围的扬子、鄂尔多斯和阿拉善地块的岩石圈厚度(200 km)小得多。因此, 相对于周围的克拉通块体而言, 本地区的岩石圈厚度减薄了。岩石圈的厚度(80~ 120 km)以及岩浆产生的深度(> 92 km)限定了本地区岩浆起源于岩石圈地幔的底部或软流圈与岩石圈的交界处。这就合理地解释了该火山岩系 Sr、Nd 同位素具亏损地幔组成特征以及不相容元素和稀土元素分布特征接近于 N_OIB 的事实。

从区域背景来看, 新特提斯大洋岩石圈向北消减以及印度、欧亚两大陆碰撞这一重大地质事件引起板内软流圈地幔热扰动(40~ 60 Ma) (邓万明等, 1998); 中新世以来, 青藏高原岩石圈受到一个东西向的拉张作用(Armijo *et al.*, 1986, 1989; Harrison *et al.*, 1992; Coleman & Hodges, 1995), 厚而重的岩石圈底部由于受到拉张而发生拆沉作用, 引起热而轻的软流圈上升(England & Houseman, 1989), 富含 LILE、LREE 和挥发组分(CO₂、CH₄等)同时具有高 Nb/Ta 值的流体交代岩石圈地幔。由于减压及等温线上升的缘故, 使得交代富集地幔岩石的温压条件与固相线相交而发生局部熔融作用。拉张初期, 岩石圈底部与软流圈的物质及能量交换规模较小, 熔融程度低, 形成了少量的超钾质岩浆岩。由于新特提斯洋壳俯冲、消减的时间与本地区钾霞橄黄长质火山活动的间隔短(20~ 30 Ma 左右), 遭受扰动的软流圈地幔源区还未来得及充分调整, 使得源自软流圈的交代流体以及随后富集地幔部分熔融形成的原始岩浆保留了新特提斯洋壳的印记(高 Nb/Ta 值)。

鉴于本地区火山岩系的 Sr、Nd 同位素组成特征、形成时代(22~ 23 Ma)、寄主岩不相容元素和稀土元素的分布特征、尖晶石相二辉橄榄岩包体的 p - T 估算结果, 结合区域超钾质岩浆岩成因模型和区域地球物理资料, 可以对本地区的钾霞橄黄长岩系岩浆产生的地球动力学过程做如下推测: ①印度、欧亚两大陆碰撞, 新特提斯大洋岩石圈向北消

减, 形成局部高 Nb/Ta 值的软流圈地幔; ②中新世以来, 青藏高原岩石圈受到东西向的拉张作用使得厚而重的岩石圈底部发生拆沉作用, 软流圈上升交代岩石圈地幔, 形成富集地幔源区; ③减压及等温线上升使得交代富集地幔岩石的温压条件与固相线相交, 岩石圈底部的热边界层发生低度部分熔融形成了本地区贫 SiO₂、Al₂O₃, 富 MgO、CaO、TiO₂ 及 K₂O+ Na₂O 的钾霞橄黄长岩质原始岩浆。整个过程物质和能量的交换发生在岩石圈底部和软流圈之间, 因而与地幔柱的机制不同, 是造山带后期的伸展作用的结果, 形成一种冷幔、热壳的结构。

3 结 论

(1) 本地区的火山岩系具有贫 SiO₂、Al₂O₃, 富 MgO、CaO、TiO₂ 及 K₂O+ Na₂O 的特征, 实际矿物组合中除橄榄石、透辉石外, 普遍含有霞石/钾霞石、黄长石/石榴石和钛金云母等矿物, 相当于 Foley (1987) 划分的钾霞橄黄长岩(Kamafugites)系。

(2) 火山岩系 Sr、Nd 示踪同位素和微量元素特征显示出与洋岛(OIB)玄武岩相似的地球化学体制, 源区具有由软流圈流体交代导致的 EM I 型地幔端员成分。

(3) 根据尖晶石相二辉橄榄岩地幔包体温、压条件估算, 结合区域地球物理资料和大体构造环境, 钾霞橄黄长岩系的原始岩浆源于 > 92 km 的岩石圈底部热边界层的低度部分熔融。

致谢: 成文过程中就有关问题曾与王江海研究员、葛文春博士和魏启荣博士进行过有益的探讨, 特此致谢!

References

- Armijo R, Tapponnier P, and Han T. 1989. Late Cenozoic right_lateral strike_slip faulting across southern Tibet [J]. *J. Geophys. Res.*, 94: 2 787~ 2 838.
- Armijo R, Tapponnier P, Mercier J P, *et al.* 1986. Quaternary extension in southern Tibet [J]. *J. Geophys. Res.*, 91: 13 803~ 13 872.
- Bau M. 1996. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems— evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 123: 323~ 333.
- Deng Wanming. 1991. Geology, geochemistry and ages of shoshonitic volcanic rocks in middle Kunlun orogenic zone [J]. *Scientia Geologica Sinica*, (3): 193~ 206 (in Chinese with English abstract).
- Deng Wanming, Sun Hongjuan. 1998. Isotopic geochemistry and source

- of intraplate volcanic rocks in North Tibet, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 5(4): 307~ 317(in Chinese with English abstract).
- Dickin A P. 1995. *Radiogenic Isotope Geology* [M]. London: Cambridge University Press, 163.
- Eggins S M, Woodhead J D, Kinsley L P J, *et al.* 1997. A simple method for the precise determination of ≥ 40 trace elements in geological samples by ICPMS using enriched isotope internal standardization[J]. *Chemical Geology*, 134: 311~ 326.
- England P, Houseman P. 1989. Extension during continental convergence, with application to the Tibetan plateau [J]. *J. Geophys. Res.*, 94: 17 561~ 17 579.
- Fan Qicheng, Liu Ruoxin, and Xie Hongsen, *et al.* 1997. Experimental study and its implications for the transformation from spinel to garnet_lherzolite in upper mantle [J]. *Science in China (Series D)*, 27(2): 109~ 114 (in Chinese).
- Foley S F, Venturelli G, and Green D H, *et al.* 1987. The ultrapotassic rocks: characteristics, classification, and constraints for petrogenetic models [J]. *Earth- Science Reviews*, 24: 81~ 134.
- Gasparik T. 1984. Two-pyroxene thermobarometry with new experimental data in the system CaO- MgO- Al₂O₃- SiO₂ [J]. *Contrib. Miner. Petrol.*, 85: 186~ 196.
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in crust- mantle system [J]. *Chemical Geology*, 120: 347~ 359.
- Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, *et al.* 1992. Raising Tibet [J]. *Science*, 255: 1 663~ 1 670.
- Hart S R, Gerlach D C and White W M. 1986. A possible new Sr- Nd- Pb mantle array and consequences for mantle mixing [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 50: 1 551~ 1 557.
- Kamber B S, Collerson K D. 2000. Role of 'hidden' deeply subducted slabs in mantle depletion [J]. *Chemical Geology*, 166: 241~ 254.
- Liu Congqiang, Xie Guanghong and Akimasa M. 1995. Geochemistry of Cenozoic basalts from Eastern China -I. Major element and trace element compositions: Petrogenesis and characteristics of mantle source [J]. *Geochemica*, 24(1): 1~ 18 (in Chinese with English abstract).
- Munker C. 1998. Nb/Ta fractionation in a Cambrian arc/ back arc system, New Zealand: source constraints and application of refined ICPMS techniques [J]. *Chemical Geology*, 144: 23~ 45.
- O' Neill H St C. 1981. The transition between spinel_lherzolite and garnet_lherzolite, and its use as a Geobarometer [J]. *Contr. Miner. Petrol.*, 77: 185~ 194.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in Ocean Basins* [C]. London: Geol. Soc. Publ., 313~ 345.
- Wang Jian and Li Jianping. 2002. Clinopyroxenes from Cenozoic kamafugites in Lixian County, West Qinling [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(3): 251~ 264(in Chinese with English abstract).
- Woolley A R, Bergman S C, Edgar A D, *et al.* 1996. Classification of lamprophyres, lamproites, kimberlites, and the kalsilitic, melilitic, and leucitic rocks [J]. *The Canadian Mineralogist*, 34: 175~ 186.
- Yu Xuehui, Mo Xuanxue and Flower M, *et al.* 2001a. Cenozoic kamafugite volcanism and tectonic meaning in west Qinling area, Gansu province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 366~ 377 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xuehui, Mo Xuanxue and Liao Zhongli, *et al.* 2001b. A study of Ga_lherzolite and Ga_websterite xenoliths in west Qinling, Gansu province [J]. *Science in China (Series D)*, 31(Supplement): 128 ~ 133(in Chinese).
- Zhang Yuquan, Xie Yingwen. 1997. The geochronology and Nd, Sr isotopic characteristics of rich_alkaline intrusive rocks in Ailaoshan- Jinshajiang belt [J]. *Science in China(Series D)*, 27(4): 289~ 294 (in Chinese).
- Zhu Bingquan, Zhang Yuquan and Xie Yingwen. 1992. Nd- Sr- Pb isotopic characteristics of tertiary ultrapotassic igneous rocks and southwest continental mantle evolution in East Erhai, West Yunnan [J]. *Geochemica*, (3): 201~ 212(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 邓万明. 1991. 中昆仑造山带钾玄质火山岩的地质、地球化学和时代 [J]. *地质科学*, (3): 193~ 206.
- 邓万明, 孙宏娟. 1998. 青藏北部板内火山岩的同位素地球化学与源区特征 [J]. *地学前缘*, 5(4): 307~ 315.
- 樊祺诚, 刘若新, 谢鸿森, 等. 1997. 上地幔尖晶石- 石榴石相转变实验研究及其意义 [J]. *中国科学(D 辑)*, 27(2): 109~ 114.
- 刘从强, 解广轰, 增田彰正. 1995. 中国东部新生代玄武岩的地球化学 -I. 主量元素和微量元素组成: 岩石成因及源区特征 [J]. *地球化学*, 24(1): 1~ 18.
- 王建, 李建平. 2002. 西秦岭礼县地区新生代钾霞橄黄长岩系的单斜辉石 [J]. *岩石矿物学杂志*, 21(3): 251~ 264.
- 喻学惠, 莫宣学, Flower M, 等. 2001a. 甘肃西秦岭新生代钾霞橄黄长岩火山作用及其构造含义 [J]. *岩石学报*, 17(3): 366~ 377.
- 喻学惠, 莫宣学, 廖忠礼, 等. 2001b. 西秦岭石榴石二辉橄橄榄岩和石榴石二辉岩包体的温度和压力条件 [J]. *中国科学(D 辑)*, 31(增刊): 128~ 133.
- 张玉泉, 谢应雯. 1997. 哀牢山- 金沙江富碱侵入岩年代学和 Nd Sr 同位素特征 [J]. *中国科学(D 辑)*, 27(4): 289~ 293.
- 朱炳泉, 张玉泉, 谢应雯. 1992. 滇西洱海第三纪超钾质火成岩系的 Nd- Sr- Pb 同位素特征与西南大陆地幔演化 [J]. *地球化学*, (3): 201~ 212.