

北秦岭古聚会带壳幔再循环*

张本仁 欧阳建平 韩吟文 匡少平

(地球化学研究所, 武汉 430074)

摘要 以同构造期代表古洋壳残片的蛇绿岩及产于古岛弧的玄武岩为基础, 通过 Nd, Pb 同位素与微量元素示踪及岩浆源区分析, 揭示出北秦岭元古宙上地幔以强亏损 ($\epsilon_{Nd}(t) + 6.3 \sim +7.3$) 和高的 Yb/Hf, Nb/La 和 Th/La 比值为特征, 北秦岭地壳和上地幔明显具有 Pb 同位素比值高的特征. 北秦岭丹凤群岛弧火山岩、二郎坪群弧后玄武岩以及松树沟蛇绿岩中变拉斑玄武岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 、放射成因 Pb 同位素、Y/Tb 和 Ti-MgO 研究表明, 本区玄武岩存在两类性质不同的岩浆源. 一类与亏损的北秦岭岩石圈上地幔源区有关; 另一类与携带海洋沉积物的洋壳板块俯冲参与有关. 由此, 论证了北秦岭古聚会带壳幔之间物质再循环.

关键词 古聚会带, 壳幔再循环, 秦岭造山带, 岛弧岩浆作用

中图法分类号 P596

第一作者简介 张本仁, 男, 教授(博士生导师), 1929年生, 1952年毕业于南京大学地质系, 1956年毕业于北京地质学院, 获硕士学位, 现任地质矿产部壳幔体系组成、物质交换及动力学开放研究实验室主任, 长期从事地球化学教学与研究工作.

在东秦岭范围内, 北秦岭于新元古代—早古生代曾为具有沟-弧-盆系的华北板块的活动大陆边缘已为许多地质、地球化学证据所证明^[1, 2].

近年多学科的研究进一步肯定: 产于华北和扬子板块主缝合带中的新元古代松树沟蛇绿岩块属古洋壳残片, 其中发现具有完全类似现代正常洋中脊玄武岩(N-MORB)化学成分的变玄武岩(表1)^[3, 4]. 新的资料与事实表明丹凤群变玄武岩应是洋内岛弧环境中形成的岩石, 其中还发现了少量具有N-MORB地球化学特征的岩块(见表1)^[5], 并且丹凤岛弧岩浆作用具有多源特征^[6]. 新的年代学研究证明: 产于弧后盆地的二郎坪群变火山-沉积岩系(上部含早古生代化石), 其下部具有新元古代的年龄数据((822 ± 80) ~ (708 ± 63) Ma, Sm-Nd等时线)^[7]; 在原认为属早古生代的丹凤群中也获得了900 ~ 1000 Ma的Sm-Nd等时线年龄^[5]. 这表明北秦岭存在新元古代同构造期的蛇绿岩及岛弧和弧后火山岩, 这时也应

有可能发生一次古洋壳的俯冲事件. 这为研究古聚会-俯冲带的壳幔再循环提供了良好的条件.

1 北秦岭幔和壳的地球化学特征

北秦岭南侧以商丹断裂主缝合带与南秦岭为界(图1), 自南而北出露的主要构造岩石地层单元依次为: 新元古代—早古生代丹凤群岛弧型变质火山-沉积岩系, 火山岩属拉斑玄武岩和钙碱性两个系列; 古元古代秦岭群变质沉积岩系(以片麻岩类为主), 含斜长角闪岩, 后者为拉斑玄武岩和成分相当的侵入岩变质的产物; 新元古代—早古生代二郎坪群弧后盆地型变质火山-沉积岩系, 火山岩也显示钙碱性和拉斑玄武岩系列的特征, 并且部分玄武岩具有岛弧玄武岩地球化学特征, 另一部分则显示出洋脊玄武岩的特征; 中元古代宽坪群变质火山-沉积岩系, 变火山岩原岩属于拉斑质玄武岩, 多具有洋脊玄武岩地球化学特征, 产于边缘裂陷海槽中^[2]. 此外, 尚有侵入于秦岭群中的少量岛弧型新元古代花岗岩类和S型花岗岩, 以及较多的早古生代岛弧型花岗岩类与少量S型花岗岩. 在商丹断裂带中还分布着新元古

1996年6月4日收稿

* 国家自然科学基金(N0. 49290102)和地质矿产部壳幔体系组成、物质交换及动力学开放研究实验室基金资助

表 1 北秦岭某些变玄武岩(N- MORB 型)的化学成分

Table 1 Chemical composition of some basalts (N- MORB type) from the North Qinling belt																		
	样品	样品数	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO *	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	La	Ce	Nd					
I	松树沟蛇绿片变拉斑玄武岩	3	45.29	5.50	13.19	8.15	13.01	1.78	0.32	1.25	4.51	10.16	8.27					
II	丹凤群变玄武岩片	1	43.41	14.50	15.08	8.70	12.27	2.10	0.33	1.65	6.26	14.50	12.40					
III	丹凤岛弧玄武岩中变镁铁质岩石包体	2	42.53	12.79	13.39	11.29	12.69	1.14	0.705	0.90	4.979	16.58	11.39					
IV	26 件玻璃持MORB	26	50.45	15.255	10.43	7.576	11.30	2.679	0.106	1.615	3.895	12.00	11.18					
	Sm	Eu	Gd	Tb	Ho	Tm	Yb	Lu	Sc	Co	Ta	Th	U	V	Cr	Ni	Rb	
I	2.82	1.14	3.98	0.773	1.253	0.57	3.833	0.62	53.03	60.7	0.373	0.33	0.432	370	290	69.6	5.68	
II	4.49	1.79	5.75	1.00	1.420	0.652	4.17	0.678	54.4	61.8	0.349	0.435	0.554	447	264	102	15.2	
III	3.023	0.935	3.15	0.513	0.709	0.314	1.895	0.279	-	37	-	-	-	150	71	153	-	
IV	3.752	1.335	5.077	0.885	1.342	0.621	3.90	0.589	41.37	47.07	0.192	0.187	0.0711	-	-	149.5	1.261	
	Sr	Nb	Hf	Zr	Y	Ba	(La/Yb) _N	La/Nb	La/Ta	Ce/Yb	Th/La	Th/Hf	Th/Ta	Th/Yb	Ta/Yb	Yb/Hf	Y/Tb	
I	222	5/16	2.53	79.7	32.5	58	0.79	0.874	12.09	2.651	0.073	0.130	0.885	0.086	0.097	1.515	42.04	
II	112	5.60	2.93	73.0	40.0	20	1.01	1.116	17.94	3.477	0.069	0.148	1.246	0.0104	0.084	1.423	40.00	
III	-	-	-	-	16	-	1.77	-	-	8.75	-	-	-	-	-	-	32	
IV	113.2	3.507	2.97	104.24	35.82	13.87	0.69	1.111	20.28	3.077	0.048	0.063	0.97	0.048	0.049	1.313	40.47	

* 换算为 FeO 的全铁 含量单位: 主量组分为%, 微量元素为 10⁻⁶. I 数据引自文献[3]; II 数据引自文献[5]; III 样品在德国 GiessenJastus- Liebig 大学地球科学和岩石圈研究所用 XRF 和 ICP- AES 方法分析; IV 数据引自文献[8]

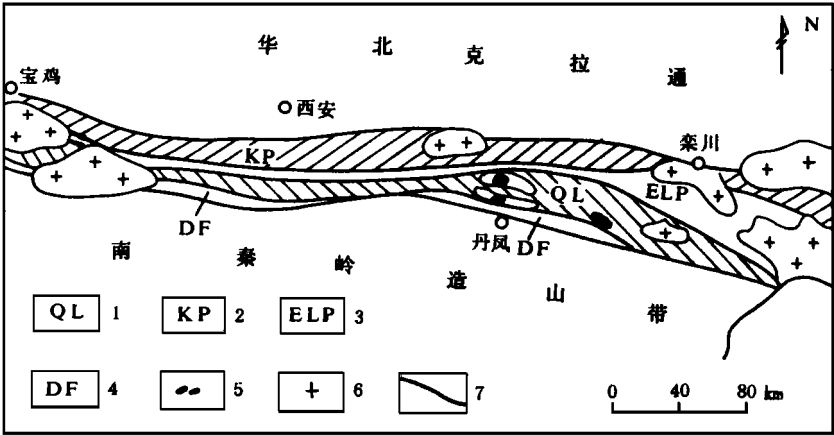


图 1 北秦岭地区地制裁略图
Fig. 1 Geological sketch map of the North Qinling area
1. 秦岭群; 2. 宽坪群; 3. 二郎坪群; 4. 丹凤群; 5. 松树沟蛇绿岩; 6. 花岗岩体; 7. 断裂带

代的蛇绿岩块, 其中以松树沟蛇绿岩块的规模最大, 由地幔残留体性质的方辉橄榄岩和纯橄榄岩、具堆集岩特征的纯橄榄岩以及变拉斑玄武岩等组成

秦岭、宽坪、丹凤和二郎坪群的变玄武岩一致具有高的初始 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(+ 6.3~ + 7.3), 表明北秦岭壳下的上地幔于整个元古宙, 甚至早古生代一直处于强亏损状态(表 2)。如果取洋脊玄武岩源区亏损地幔(DM)现代的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为+ 10, 则 2000 Ma 前亏损地幔的 $\epsilon_{Nd}(t)$ = + 5.7, 1000Ma 前 $\epsilon_{Nd}(t)$ = + 7.8 相比之下, 形成于 1980Ma 前的秦岭群拉斑玄武岩的初始 $\epsilon_{Nd}(t)$ = + 7.3, 表明其地幔源区亏损的程度大于当时的亏损地幔; 新元古代蛇绿岩片中拉斑玄武岩(1000Ma)的初始 $\epsilon_{Nd}(t)$ = + 6.8, 同时代丹凤群玄武岩(1000Ma)的初始 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值高达+ 7.3, 也接近当时的亏损地

幔 然而北秦岭北侧华北克拉通南缘新太古代太华群和登封群变拉斑玄武岩及古元古代绛县群和中条群变玄武岩的初始 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值均较低(+ 2.2~ + 2.9), 表明那里早期上地幔亏损程度弱于北秦岭同时代的上地幔(见表 2), 而且在太古宙到古元代很第的一段时期内近乎处于较弱亏损的定态(steady state)。

基于强不相容元素与化学性质相近的不相容元素对在玄武岩中的比值能反映其幔源区的比值^[11, 12], 通过北秦岭古元古代秦岭群、中元古代宽坪群和新元古代蛇绿岩变玄武岩同华北克拉通南缘新太古代西阳河和熊耳群变玄武岩的对比, 可揭示出北秦岭整个元古宙的上地幔较华北克拉通南缘早期上地幔具有相对高的 Yb/Hf, Nb/La 和 Th/La 比值, 及相近的 Y/Tb 比值(见表 2)。虽然丹凤群和二郎坪群玄武岩, 由于分别属于岛弧

表 2 北秦岭(NQ)与华北克拉通南缘(SNC)前寒武纪变玄武岩的地球化学特征

Table 2 Geochemical characteristics of the Precambrian mafic basalts from the North Qinling belt (NQ) and the southern margin of North China craton (SNC)

构造单元	岩群	年代/Ma	样品数	TDM/Ga	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	Yb/Hf	Nb/La	Tb/La	Y/Tb*	资料来源
SNC	太华群	2 840	12	2.9~2.6	+2.9	0.82	0.79	0.112	34.16	据文献
	登封群	2 509	10	2.7~2.6	+2.2	0.52	0.63	0.117	35.85	据文献[9]
	降县宋家山和中条群	2 500~2 100	10	2.8~2.5	+2.2~2.5	0.76	0.65	0.121	35.58	据文献[10]
	西阳河和熊耳群	1 840~1 600	15	3.1	-4.1~7.8	0.59	0.32	0.064	36.97	据文献[10]
NQ	秦岭群	1 989	11	2.0	+7.3	1.04	1.03	0.181	36.50	据文献[7]
	宽坪群	1 142	49	1.7	+6.5~+4.2	1.05	1.01	0.148	36.18	据文献[7]
	蛇绿岩	1 100	11	1.1~1.6	+6.8	1.236	1.32	0.159	36.16	据文献[3]
	丹凤群	900~1 000	39	1.0~1.1	+7.3~+4.9	1.153	0.417	0.324	36.5和29	据文献[5]
	二郎坪群	708~822	81	1.3~1.6	+6.3~3.7	1.113	0.403	0.236	36.5和29	据文献[7]

* Y/Tb 根据本文数据(湖北地矿局岩矿测试所采用 ICP 测定)的计算值

表 3 北秦岭和华北克拉通南缘岩石及花岗岩长石 Pb 同位素平均组成

Table 3 Average Pb isotopic composition of the rocks and feldspar of granites from the North Qinling belt and the southern margin of North China craton

构造单元	岩石或矿物	样品数	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	数据来源
华北陆块南缘	新太古代太华群(TH)变拉斑玄武岩	3	17.547	15.490	37.652	据文献[13]
	新太古代太华群片麻岩	3	17.271	15.455	37.562	据文献[13]
	太华群伟晶状混合岩	2	16.635	15.198	36.572	据文献[13]
	新太古代登封群变拉斑玄武岩	1	17.267	15.351	37.342	本文
	古元古代安沟群变玄武岩	2	16.126	15.265	37.099	本文
	中元古代熊耳群变玄武岩	2	16.279	15.300	36.047	本文
	中生代长石	26	17.470	15.427	37.799	据文献[14]
	A ³ -2* 中生代长石	86	17.460	15.481	37.965	据文献[15]
	河南汝阳新第三纪玄武岩	2	17.510	15.477	37.470	本文
	汉诺坝-大同新第三纪玄武岩	8	17.533	15.378	37.495	据文献[16]
北秦岭	古元古代秦岭群变镁铁质岩	4	18.483	15.625	38.359	据文献[17]
	古元古代秦岭群片麻岩	9	18.114	15.601	38.343	据文献
	秦岭群大理岩黄铁矿	4	18.312	15.571	38.168	本文
	中元古代宽坪群变拉斑玄武岩	2	18.775	15.774	39.105	本文
	Pt ₃ -Pz ₁ 丹凤群变玄武岩	11	18.383	15.539	38.136	据文献[5, 18]
	Pt ₃ -Pz ₁ 二郎坪群变玄武岩	3	18.233	15.542	38.460	本文, 文献[18]
	Pz ₁ 斜峪关、云架山、草滩沟群变火山岩	3	18.716	15.614	39.036	据文献[18]
	桐柏镁铁质麻粒岩	2	18.291	15.456	38.259	据文献
	新元古代蛇绿岩中变拉斑玄武岩	6	18.462	15.579	38.293	本文
	新元古代蛇绿岩中变方辉橄辉岩	1	18.248	15.699	38.441	本文
	新元古代长石(659~670Ma)	4	18.285	15.676	38.327	本文
	早古生代长石(450~380Ma)	8	18.208	15.542	38.095	本文, 文献[19]
	晚古生代—早中生代长石	8	17.617	15.442	37.658	本文
	燕山期长石	4	17.852	15.537	38.193	本文

和弧后盆地火山作用产物, 而亏损高场强元素, 但是除了强烈亏损 Nb 导致 Nb/La 比值明显偏低外, 它们的 Yb/Hf 和 Tb/La 仍与上述北秦岭变玄武岩, 尤其是蛇绿岩片中的变拉斑玄武岩的各项比值相近, 表明这些岩石在幔源区上的一致性

北秦岭全部元古宙变玄武岩、秦岭群的片麻岩和大理岩、早古生代变火山岩(斜峪关、云架山和草滩沟群), 以及新元古代和早古生代花岗岩类长石一致显示出异常富放射成因铅的 Pb 同位素组成特征, 它们的 Pb 同位素比值不仅明显高于北侧华北二郎坪群玄武岩, 由于分别属于岛弧和弧后盆地火克拉通南缘前寒武纪基底岩石、中生代花岗岩类长石和第三纪玄武岩的 Pb 同位素比值(表 3), 而且也高于南侧南秦岭的前寒武基底岩石及晚古生代—早中生代花岗岩类长石的 Pb 同位素比值 鉴

张宗清 私人通信 1996

游振东, 索书田, 韩郁菁等. 关于秦岭群变质变形史及古构造样式研究的汇报. 1987.

朱炳泉. 关于同位素填图研究的报告. 中国科学院广州地球化学研究所, 1991.

于花岗岩类长石铅基本代表的是岩石形成时的初始 Pb 同位素组成, 新元古代花岗岩类长石 (670Ma) 的高 Pb 同位素比值表明北秦岭地壳早期就是富集放射成因铅的。新元古代蛇绿岩片中的变拉斑玄武岩及变质方辉橄榄岩 (蛇绿岩套底部的残留地幔岩石) 具有相近的高 Pb 同位素比值, 也暗示北秦岭上地幔的富放射成因铅。

鉴于北秦岭早期岩石圈在化学组成与同位素组成方面的特殊性, 结合其地壳增生历史及早期上地幔性质与演化趋势同两侧华北和扬子陆块的差异, 证明了北秦岭应为独立发展的微陆块, 很可能是在秦岭古洋壳上的洋岛基础上发展形成的^[20, 21]。

2 丹凤岛弧玄武质岩浆的多源特征

为揭示岛弧火山岩浆的演化特征, 我们对丹凤群玄武质岩浆系列岩石分别做多种组分和元素对分异指数 (DI) 和固结指数 (SI) 的图解, 结果发现在 TiO_2 - DI , Al_2O_3 - DI , $(FeO + Fe_2O_3)$ - DI , 以及 TiO_2 - SI , Al_2O_3 - SI 和 $(FeO + Fe_2O_3)$ - SI 图解上, 均显示出两条独立的演化趋势线。这两种演化趋势在 $Ti/1000$ - Mg 图解上显示得更为明显细致 (图 2), 由图解可以看出一种岩浆 (A) 相对低 Ti , 随 Mg 含量降低, Ti 含量 (沿 a 演化线) 先缓缓增长而后显著下降, 并以此种岩浆最早晶出的岩石细小包体的成分为演化线的起点; 另一种岩浆 (B) 相对高 Ti , 随 Mg 含量降低, Ti 含量 (沿 b 演化线) 逐步明显增长, 并以另一种镁铁质岩石细小包体的成分为演化线的起点。此外, 图解上还显示出少量 A 和 B 的混合岩浆的存在, 因此这种结果表明丹凤岛弧玄武质岩浆应主要形成于两个源区。

以地幔部分熔融过程中化学性质相近的 Y 和 Tb 的比值为指标^[11], 揭示丹凤群岛弧玄武岩和二郎坪群弧后盆地玄武岩的地幔源区。结果发现两群玄武岩一致显示出 Y/Tb 比值不同的源区 (图 3), 一个为 Y/Tb 比值高 (约 36.5) 的源区, 另一个为 Y/Tb 比值相对低 (约 29) 的源区。这同样证明了丹凤岛弧玄武岩岩浆主要具有两个源区。

前人研究已经表明岩浆作用的多源性常为洋壳俯冲带岛弧区岩浆活动的特征之一, 并认为俯冲带之上的岩石圈地幔楔和俯冲大洋板片应分别为两个主要岩浆源区^[22]。二郎坪群玄武岩同丹凤群

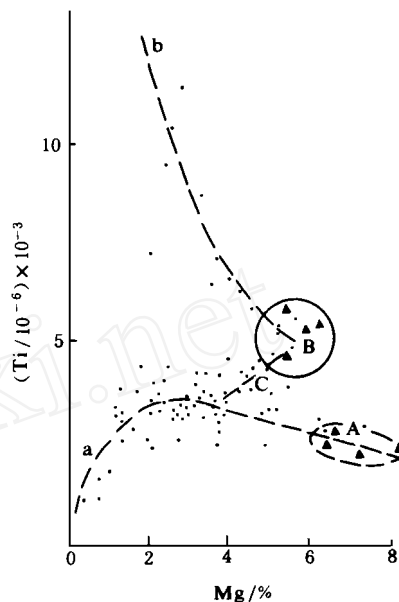


图 2 丹凤群玄武质火山岩系 $Ti/1000$ - Mg 演化线
Fig. 2 $Ti/1000$ vs Mg plot for the basaltic volcanic rock series of Danfeng Group

· 丹凤地区火山岩; ▲ 镁铁质岩石包体
· 丹凤地区火山岩; ▲ 镁铁质岩石包体

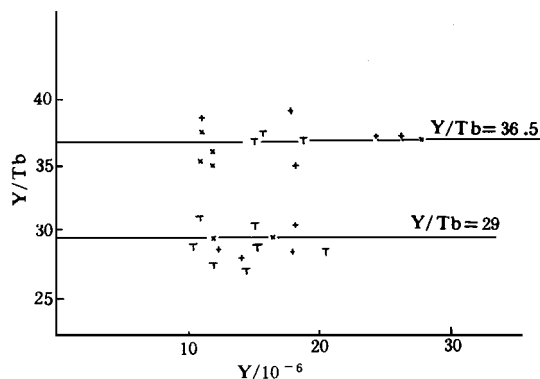


图 3 丹凤群和二郎坪群玄武岩 Y/Tb - Y 图解
Fig. 3 Y/Tb vs Y plot for basalts of the Danfeng and Erlangping groups

× 丹凤群; + 西部二郎坪群;

玄武岩具有一致的高、低 Y/Tb 比值两个源区, 暗示俯冲洋壳板片的影响可能波及至弧后盆地中的石和第三纪玄武岩的 Pb 同位素比值 (表 3), 而且火山岩浆源区。这种现象已在某些文献中有报道^[2, 3]。

3 壳幔间的再循环

丹凤群玄武岩中, 相对高 Ti 的样品, Y/Tb

比值相对低, 而相对低 Ti 的样品则具有较高的 Y/Tb 比值, 表明玄武岩浆一类(B)为相对高 Ti 和低 Y/Tb 比值的, 另一类(A)为相对低 Ti 和高 Y/Tb 比值的 那么这两类岩浆的具体源区和源岩为何呢?

由秦岭群和宽坪群变玄武岩Nd和Pb同位素组成及强不相容和化学性质相似的不相容元素的比值(见表2), 可以推断北秦岭岩石圈地幔(组成古俯冲洋壳板片上方的地幔楔)在洋壳俯冲之前就应是强亏损型的, 富放射成因Pb, 相对高 Yb/Hf , Nb/La 和 Th/La 比值, 其 Y/Tb 比值也应是接近 36 5; 因此, 具有这种特征的地幔楔正好可以满足作为 Y/Tb 比值为 36 5 的玄武岩浆(A)的源区在Nd和Pb同位素组成及 Y/Tb 比值方面的要求 丹凤群岛玄武岩 Yb/Hf 比值(平均)的稍稍偏高和 Nb/La 比值(平均)的明显偏低, 看来应是由洋壳俯冲带中特殊的物理化学条件导致的岛弧岩浆亏损高场强元素Nb和Hf的结果^[8, 24].

丹凤群岛玄武岩和二郎坪群弧后玄武岩具有同松树沟蛇绿岩片中变拉斑玄武岩相近的 $Sm-Nd$ 模式年龄和初始 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值, 在高Pb同位素比值方面彼此也相似, 暗示以松树沟蛇绿岩片所代表的俯冲古洋壳板片可能为另一种岩浆(B0)的源区 由于这种岩浆(B)具有相对低 Y/Tb 比值的特征($Y/Tb=29$), 可以推断这一源区中有随俯冲洋壳板片带入的少量深海泥质沉积物的参加, 因为深海泥质沉积物的 Y/Tb 比值 这种推断的合理性, 还可由下述事实证明, 深海泥质沉积物一般具有低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和高的Pb同位素比值(与MORB相比较), 它们加入岩浆形成的源区, 必然会引起这种岩浆形成岩石的Pb同位素比值随初始 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值降低而规律增高的趋势 丹凤群玄武岩初始值 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值与Pb同位素比值之间存在着明显的反消长关系(表40, 表明情况正是如此 此外, 虽然丹凤群玄武岩的 Yb/Hf 和 Nb/La 平均比值会受到岛弧玄武岩一般亏损(Nb, Hf)规律的影响, 但此类岩石在 Yb/Hf 和 Th/La 比值方面还是更接近蛇绿岩片的变拉斑玄武岩的

作为丹凤岛弧玄武质岩浆b演化线起点的镁铁质岩石外体, 常见于丹凤地区的岛弧玄武岩中, 经鉴别岩石类似变质橄榄辉长岩, 化学成化总体

表 4 丹凤群变玄武岩 Nd 和 Pb 同位素组成
Table 4 Nd and Pb isotopic compositions of metabasalts of the Danfeng Group

$\epsilon_{Nd}(t)$	样品数	$^{206}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{204}Pb$	$^{208}Pb/^{204}Pb$
7.3~6.7	7	18.292	15.526	38.087
6.4~5.4	2	18.280	15.550	38.125
4.9	1	19.053	15.572	38.147

数据引自文献[5]

上接近N-MORB. 然而, 其MgO和强相容元素Ni含量明显高于N-MORB, 以及K₂O和强不相容元素La, Ce等也高于N-MORB(见表1). 因此, 可以推断这种包体可能是俯冲洋壳板片中组成洋壳下部的镁铁质岩经部分熔融后残留固相的碎块, 在被玄武质岩将携带过程中又受到岩一定程度的混染, 结果造成包体岩石中相伴出现强相容和强不相容元素, 含量相对MORB增高 如果这种推断符合事实, 则可进一步证明凤岛弧岩浆(B)为俯冲洋壳部分熔融的产物

总之, 丹凤群玄武岩的多源性及有俯冲洋壳与其沉积物参与岩浆的形成, 不仅能进一步确证北秦岭丹凤群火山岩系形成于古岛弧构造环境, 同时还较成功地揭示了秦岭造山带内新元古代的洋-陆作用阶段曾发生古洋壳的俯冲消减及壳幔间的理循环

参 考 文 献

1 张国伟, 梅志超, 周鼎武 秦岭造山带的形成及演化 西安: 西北大学出版社, 1988 1~ 192
2 张本仁, 骆庭川, 高山等 秦巴岩石圈构造及成矿规律 地球化学研究 武汉: 中国地质大学出版社, 1994 1~ 446
3 周鼎武, 张泽军, 董云鹏等 东秦岭南松树沟元古宙蛇绿岩片的地质地球化学特征 岩石学报, 1995, 11(增刊): 154~ 164
4 Chen N S, Yang Y, Zhou H W, et al High pressure metamorphism of garnet - amphibole rocks from Songshugou area, eastern Qinling Mountain and its tectonic implication Journal of China University of Geosciences, 1993, 4(1): 36~ 45
5 张旗, 张宗清, 孙勇等 陕西商县- 丹凤地区丹凤群变玄武岩的微量元素和同位素地球化学 岩石学报, 1995, 11(11): 43~ 54
6 匡少平, 张本仁 东秦岭丹凤群火山岩系及其包体地球化学研究 现代地质, 1993, 7(4): 144~ 157
7 张宗清, 刘敦一, 傅国民 北秦岭变质地层同位素年代学研究 北京: 地质出版社, 1994 1~ 191

- 8 Sun S S, Nesbitt R W, Sharaskin A Ya. Geochemical characteristics of mid-ocean ridge basalts. *Earth Planet Sci Lett*, 1979, 44: 119~138
- 9 李曙光, Hart S R, 郭安林等. 河南中部登封群全岩 Sm-Nd 同位素年龄及其构造意义. *科学通报*, 1987, 22: 1728~1732
- 10 孙大中, 胡维兴. 中条山前寒武纪年代构造格架和年代地壳结构. 北京: 地质出版社, 1993. 1~180
- 11 Bougault H, Joron J L, Treuil M. The primordial chondritic nature and large-scale heterogeneities in the mantle: evidence from high and low partition coefficient elements in oceanic basalts. *Philos Trans R Soc London, Ser A*, 1980, 297: 203~213
- 12 White W M, Patchett J H. Nd-Sr and incompatible element abundances in island arcs: implications for magma origins and crust-mantle evolution. *Earth Planet Sci Lett*, 1984, 67: 167~185
- 13 李英, 任崔锁. 华北地台南缘铅同位素演化. *西安地质学院学报*, 1990, 13(2): 1~12
- 14 黄典豪, 聂凤军, 王义昌等. 东秦岭地区钼矿床铅同位素组成特征及成矿物质来源初探. *矿床地质*, 1984, 3(4): 45~56
- 15 张理刚, 刘敬秀, 王可法等. 东亚岩石圈块体地质上地幔、基底和花岗岩同位素地球化学及其动力学. 北京: 科学出版社, 1995. 1~252
- 16 解广轰, 王俊文, 刘丛强. 汉诺坝玄武岩及大同火山岩群的岩石学和同位素地球化学. *地球化学*, 1989, (4): 277~286
- 17 胡鹏云, 王亚力, 徐汉民等. 商县铁炉子锌金矿床稳定同位素研究. *陕西地质*, 1989, 7(1): 56~76
- 18 张珠福. 北秦岭早古生代海相火山岩及其成因机理: [学位论文]. 武汉: 中国地质大学研究生院, 1995
- 19 谢红接, 戎嘉树, 冯明月等. 东秦岭加里东灰池子岩体物源的 Nd-Sr-Pb 同位素示踪研究. 见: 中国矿物岩石地球化学学会同位素地球化学专业委员会, 中国地质学会同位素地质专业委员会编. 壳幔演化与成岩成矿同位素地球化学第五届全国同位素地质年代学、同位素地球化学学术讨论会文集. 北京: 地震出版社, 1993. 32~33
- 20 张本仁, 张宏飞, 赵志丹等. 东秦岭及邻区壳幔地球化学 20 分区和演化及其大地构造意义. *中国科学(D 辑)*, 1996, 26(3): 201~208
- 21 欧阳建平, 张本仁. 北秦岭微古陆形成与演化的地球化学证据. *中国科学(D 辑)*, 1996, (4) (待刊)
- 22 Wyllie P J, et al. Volcanic rocks: boundaries from experimental petrology. *Forsch Mineral*, 1987, 65: 249~284
- 23 White W M. Geochemical evidence for crust-to-mantle recycling in subduction zones. In: Hart S R, Gulen L, eds. *Crust/mantle recycling at convergence zones*, Natilasi series [s 1]. Kluwer Academic Publishers, 1989. 43~58
- 24 Kelmen P B, Johnson K T M, Kinzler R J, et al. High-field-strength element depletions in arc basalts due to mantle-magma interaction. *Nature*, 1990, 345: 521~523
- 25 Turekian K K, Wedepohl K H. Distribution of the elements in major units of the earth crust. *Geol Soc Amer Bull*, 1961, 72: 172~192

CRUST- MANTLE RECYCLING AT THE ANCIENT CONVERGENCE ZONE IN NORTH QINLING

Zhang Benren Ouyang Jianping Han Yinwen Kuang Shaoping
(*Geochemical Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074*)

Abstract A Neoproterozoic convergence-subduction zone has been identified in the North Qinling belt from geological and geochemical studies. Nd isotopic composition and highly incompatible elements ratios (Nb/La, Th/La, Yb/Hf, Y/Tb) of Proterozoic mantle-derived rocks, and the Pb isotopic composition of Proterozoic and Early Paleozoic mantle- and crust-derived rocks, reveal that the North Qinling is characterized by high depletion ($\epsilon_d(t) = +6.3 \sim +7.3$) and higher Yb/Hf, Nb/La and Th/La ratios in the upper mantle, and by distinctively high Pb isotopic ratios in both the crust and upper mantle. The Neoproterozoic island-arc basalts of the Danfeng Group are similar in the initial $\epsilon_d(t)$ value (up to +7.3) and high Pb isotopic ratios to both the North Qinling

upper mantle and the Neoproterozoic ophiolitic metatholeiite with geochemical features of MORB. The Sm - Nd model age and Yb/Hf ratio of Danfeng basalts are closer to those of the ophiolitic metatholeiite compared with the Paleo- and Mesoproterozoic mantle- derived rocks from North Qinling. The Danfeng basalts are suggested to be generated by magmas from two main sources based on the Y/Tb vs Y and Ti vs MgO plots. The source with Y/Tb ratio of about 36.5 is deduced mainly to be the North Qinling depleted lithospheric mantle with a similar Y/Tb ratio which constituted the mantle wedge above the subduction zone. The source with Y/Tb ratio of about 29 is reasonably considered as the subducted oceanic slab together with some pelagic sediments generally characterized by significantly lower Y/Tb ratio and $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ value and higher radiogenic Pb compared with typical MORB. The increasing trend in Pb isotopic ratios with decreasing in $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ value of Danfeng basalts in combination with lower Y/Tb ratio in many samples of the basalts implies the involvement of sedimentary material in the genesis of Danfeng island- arc volcanics. Thereby, the result demonstrates the recycling of crustal materials into the upper mantle at the convergence- subduction zone.

Key words ancient convergence zone, crust- mantle recycling, Qinling orogenic belt, magmatism in island- arc setting

简 讯

金振民教授当选为国际大陆科学钻探计划(ICDP)科学顾问组委员

中国地质大学金振民教授于1996年5月28日当选为国际大陆科学钻探计划(International Continental Drilling Program, ICDP)科学顾问组委员(SAG)。ICDP组织发起国有: 中国、美国和德国。科学顾问组(SAG)由来自世界的12名科学家组成。为了实现人类社会的持续性发展, 地球科学界开始采用科学钻探工程向地球深部进军。大陆科学钻探计划(ICDP)是利用高、深钻探技术, 对地球内部成象的现代地球物理遥测技术构成的综合系统进行直接观测研究, 从而揭示具有全球意义的重大地球科学问题。我国地质矿产部“大陆科学钻探中心”在全国地学界同行的协助下, 正在为开展我国“大陆科学钻探工程”而积极准备。这是一项高科技的系统科学工程, 也是我国地球科学界一件具有深远意义的大事。金振民教授的当选, 将为推动我校大陆科学钻探研究及我校“211工程”建设发挥积极作用。