

碧口群火山旋回及其地质构造意义

徐学义 夏祖春 夏林圻

(中国地质调查局西安地质矿产研究所 陕西 西安 710054)

摘要:通过详细的野外剖面观察和室内岩石地球化学研究,将碧口群火山岩划分为3个火山旋回,每个旋回下部为基性火山岩(细碧岩及细碧质凝灰岩),上部为酸性火山岩(石英角斑岩或石英角斑质凝灰岩)。基性火山岩富集LREE及LIL。第一旋回基性火山岩属碱性系列,第二、三旋回基性火山岩属拉斑玄武岩系列。基性火山岩浆形成于与洋岛玄武岩类似的地幔柱源,其中第三旋回基性火山岩浆晚期受岩石圈地幔混染;酸性火山岩为地壳重熔作用的产物。碧口群火山岩属大陆裂谷双峰式火山岩系,是中一新元古代扬子地块北缘大陆拉张作用的产物。这种拉张作用是秦岭造山带从震旦纪开始的大规模扩张作用的先兆。

关键词:西秦岭;碧口群;火山旋回;双峰式火山岩;大陆裂谷

中图分类号:P588.14 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-2552(2002)-08~09-0478-08

碧口群火山岩系分布于陕西、甘肃、四川3省交界处,东起陕西勉县,经甘肃康县、碧口,西至四川平武,出露面积近10 000 km²。碧口群位于扬子地块北缘、秦岭造山带西南侧的碧口微地块上。张国伟等将碧口微地块划入扬子地块北缘秦岭造山带前陆逆冲断褶带内^[1]。碧口群被震旦系覆盖,震旦系已获得651 Ma(Rb-Sr等时线)的年龄数据^[2]。历年来,前人报道碧口群同位素年龄值在1 611~764 Ma之间,因此,碧口群火山岩系时代应属中元古代—新元古代。

自20世纪70年代以来,一些研究者曾提出碧口群是蛇绿岩套的组成部分,形成于岛弧、洋脊、洋岛环境,并提出存在碧口群蛇绿混杂岩带的认识^[3~4]。在80年代,大多数有关碧口群的论著几乎都认为碧口群是蛇绿岩型火山岩系。90年代以来,已有人开始对这一论点提出质疑^[5]。碧口群火山岩系性质的研究涉及到南秦岭、扬子地块北缘中一新元古代构造体制的重大问题,是研究者必须回答的问题。本文将对作者有关碧口群火山岩系新一轮的研究成果作一报道。

1 地质简况

碧口群总体上呈南西西—北东东向分布,可以略阳—燕子砭为界,分成东西两区。略阳—燕子砭以西地区碧口群呈向南倾的倒转背斜,其中甘肃碧口至枫相一带,倒转背斜的形态保存最好;向东至白杨一带,倒转复背斜中次一级褶皱十分发育。略阳—燕子砭以东地区,即著名的勉略宁三角带,为勉略缝合带和青川—勉县断裂带的交会处,断裂构造十分发育。其北部以北西西向构造为主,南部以北东东向构造为主,至勉县处交会(图1),碧口群在这一地区被分割为许多断块,在不同的断块中以单斜岩层或倒转褶皱出现。

碧口群火山岩系主要由细碧岩类和石英角斑岩类组成,角斑岩很少出现。细碧岩类包括细碧岩、细碧玢岩、细碧质凝灰岩及细碧质火山角砾岩;石英角斑岩类包括石英角斑岩及石英角斑质凝灰岩。

2 火山旋回划分及特点

在碧口群火山岩系中共测制11条剖面,剖面分

收稿日期:2001-12-30;修订日期:2002-03-10

科研项目:原地矿部地调局“九五”科技专项资助(编号:96-28)。

作者简介:徐学义,1966年生,男,博士,副研究员,从事岩石地球化学方面研究。

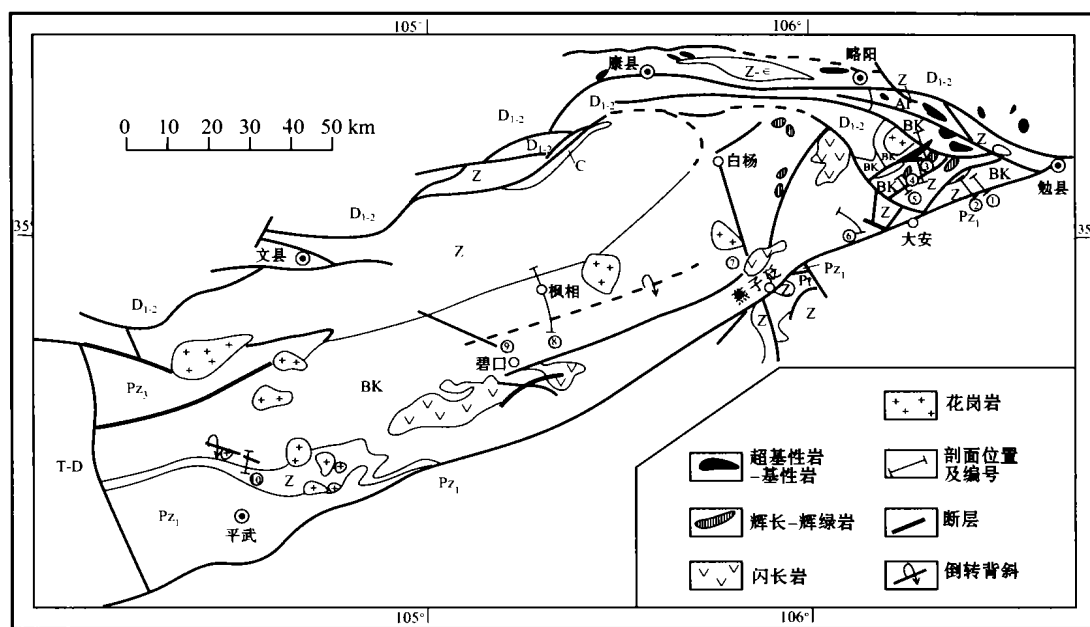


图1 陕、甘、川碧口群分布区地质略图

Fig. 1 Geological sketch map of the Bikou Group in Shaanxi, Gansu and Sichuan provinces
 D-T—泥盆系—三叠系; C—石炭系; D_{1-2} —中—下泥盆统; Pz_2 —上古生界; Pz_1 —下古生界; Z—震旦系—寒武系;
 Z—震旦系; Pt_1 —新元古界刘家坪组; BK—中—新元古界碧口群; Ar—太古—元古宇鱼洞子群

布示于图1。野外地质观察和室内综合研究表明,碧口群火山岩系可划分为3个火山喷发旋回,每个旋回下部为基性火山岩,上部为酸性火山岩。3个火山喷发旋回之间为整合接触。从东至西3个火山旋回的出露情况、岩层厚度及岩性特点在空间上均有变化,用柱状对比方式示于图2。各火山旋回具体特点分述如下:

第一旋回下部基性火山岩(BK_1^1)只在中部甘肃碧口、枫相及韭菜岩一带出露,出露厚度70~908 m,主要出露在复背斜轴部,出露厚度不全。岩石主要为细碧岩和同质凝灰岩,片理化及碳酸盐化较强。

第一旋回酸性火山岩(BK_1^2)在全区均出露,厚度变化大,在枫相剖面上厚度为1 427 m,往东到韭菜岩一带为196 m。岩性均以石英角斑质凝灰岩为主,夹有薄层熔岩;在中部厚度大的地方,常夹有已变质的沉凝灰岩—凝灰质砂岩或粉砂岩等(现为千枚岩、板岩)。

第二旋回基性火山岩(BK_2^1)厚度变化于276~1 964 m之间,由细碧岩、细碧玢岩、细碧质凝灰岩组成。在东部较发育,厚度大于670 m,而且熔岩比较多;在中部甘肃境内厚度变化于504~1 693 m之间,

片理化较强;在西部阴平一带厚仅276 m。

第二旋回上部酸性火山岩(BK_2^2)厚度变化于5~6 295 m之间。中部枫相至碧口一带厚度可达4 701~6 295 m,以石英角斑质凝灰岩为主,同时夹多层变质沉凝灰岩及粉砂岩(现为片岩、千枚岩、板岩);东部勉略宁地区除在红岩沟一带厚度可能大于1 200 m外,其他都在200~300 m之间,以石英角斑质凝灰岩为主,间夹薄层熔岩,仅在大干沟地区有较好的熔岩出现;西部阴平一带厚度仅5 m,且均为熔岩。

第三旋回下部基性火山岩(BK_3^1)在东部勉略宁地区较发育,最厚可达1 146 m,且熔岩细碧岩较多,保存有良好的枕状构造,在黑木林一带细碧岩中出现少量角斑岩;在中部甘肃境内最厚可达801 m,细碧质凝灰岩发育;在西部阴平一带厚仅169 m,且以熔岩为主。

第三旋回上部酸性火山岩(BK_3^2)在某些地区没有出现(红岩沟、七姓坝),震旦系直接不整合于 BK_3^1 之上。 BK_3^2 出露厚度在136~1 880 m之间。东部以石英角斑质凝灰岩为主,但在红土石至秦家砭一带石英角斑岩及角斑岩呈厚层状出现;中部在石英角斑质凝灰岩中夹有许多变质沉凝灰岩或粉砂岩类(现为

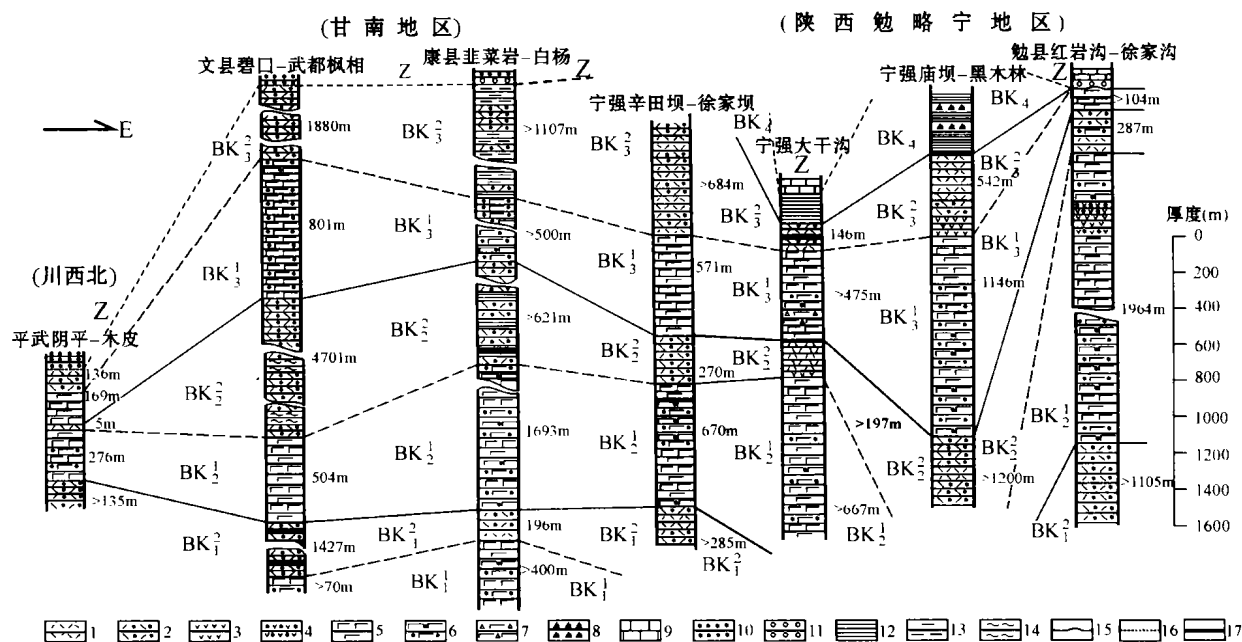


图2 碧口群火山岩系柱状对比图

Fig. 2 Columns of the Bikou Group volcanic rocks

- 1—石英角斑岩;2—石英角斑质凝灰岩、沉凝灰岩;3—角斑岩;4—角斑质凝灰岩及沉凝灰岩;5—细碧岩;
6—细碧质凝灰岩及沉凝灰岩;7—细碧质火山角砾岩;8—超基性岩;9—灰岩;10—变砂岩;11—变砾岩;
12—板岩;13—千枚岩;14—片岩;15—不整合;16—平行不整合;17—断层

千枚岩、板岩),厚度也较大(1 107~1 880 m);西部石英角斑质凝灰岩夹薄层熔岩,厚度仅136 m。

在东部陕西境内从红土石至大干沟一带,在火山岩系之上震旦系之下尚出现沉积岩系,为黑色炭质板岩、青灰色泥质板岩,有时夹有灰岩透镜体(BK₄)。

综上所述,3个火山旋回在空间上的分布特点可概括为:(1)3个火山旋回在中部甘肃出露齐全,在东部陕西及西部四川均未出现BK₁¹,有少数地区缺失BK₃²;(2)火山岩系在中部甘肃地区最厚,厚度近万米,往东至陕西减至2 500~4 000 m,往西至四川更薄,阴平一带仅721 m。每一旋回及每一旋回下、上部的基性、酸性火山岩厚度在空间上变化都较大,反映了空间上碧口群古海相火山活动强度的不均一;(3)在岩性分布上,东部地区二、三旋回中基性火山岩厚度多大于酸性火山岩,西部阴平剖面也表现基性火山岩较酸性火山岩发育;(4)酸性火山岩中夹有较多的变质沉凝灰岩及粉砂岩、泥岩等,表明在每一旋回下半期的酸性火山作用过程中常

有间歇,并伴有沉积作用发生;(5)东部地区在火山作用结束后有明显的沉积作用,形成了炭质板岩等沉积层,而中西部地区,震旦系直接覆盖在火山岩系之上。

3 各旋回火山岩岩石地球化学特点

3.1 基性火山岩和酸性火山岩为非同源岩浆

3个旋回火山岩系代表性样品成分列于表1,主要成分变化范围列于表2。化学成分研究表明,本区基性火山岩和酸性火山岩的成分演化各成序列,以SiO₂-MgO相关图为代表(图3),可以看到,随着SiO₂含量的升高,基性和酸性火山岩的MgO出现不同的递减斜率。因此,基性火山岩和酸性火山岩之间没有相同的化学成分演化关系,两者不是从同一母岩浆中通过结晶分异作用形成的不同岩石类型。3个旋回中中性岩很少,可分为与细碧岩类有成分演化关系和与石英角斑岩有成分演化关系两类。因此,作者将与细碧岩共生的角斑岩归入基性火山岩,与石英角斑岩共生的角斑岩归入酸性火山岩类。

表 1 碧口群火山岩代表性样品的主量元素、微量元素及同位素分析结果
Table 1 Major element, trace element and isotope analyses of representative samples
of volcanic rocks in the Bikou Group

序 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
火山旋回	I		II				III						
岩石名称	细碧岩	石英角斑 岩	细 碧 岩			石英角斑 岩	细 碧 岩				石 英 角 斑 岩		
SiO ₂	48.48	67.93	54.01	48.54	54.57	68.46	51.69	51.57	54.15	55.10	68.37	75.54	75.67
TiO ₂	1.75	0.54	1.65	2.23	2.00	0.35	0.80	1.29	0.62	0.75	0.32	0.33	0.33
Al ₂ O ₃	15.90	16.60	17.51	16.84	14.97	15.20	13.30	16.84	16.46	16.14	15.98	12.51	12.03
Fe ₂ O ₃	6.50	3.13	5.36	5.70	4.31	1.33	2.53	7.71	3.44	4.50	1.86	1.45	3.04
FeO	7.70	1.86	5.50	6.30	6.70	2.68	4.67	4.76	4.76	4.00	1.76	0.83	1.05
MnO	0.22	0.14	0.23	0.23	0.15	0.04	0.15	0.19	0.15	0.15	0.06	0.06	0.06
MgO	5.10	0.60	2.31	3.50	3.29	0.30	3.40	3.40	4.00	5.01	1.33	0.38	0.10
CaO	7.40	0.41	4.00	6.10	5.18	0.50	9.45	5.30	6.50	5.12	0.60	0.97	0.90
Na ₂ O	1.26	6.41	5.31	4.50	4.70	5.30	4.60	5.11	4.35	6.30	7.00	5.85	5.00
K ₂ O	0.36	0.12	0.98	0.41	0.40	2.81	0.28	0.18	0.45	0.37	0.68	0.96	1.02
H ₂ O ⁺	1.20	2.00	1.25	2.11	2.88	1.85	2.28	1.55	1.86	0.37	1.09	0.58	0.70
P ₂ O ₅	0.32	0.11	0.51	0.77	0.69	0.11	0.14	0.30	0.17	0.15	0.05	0.07	0.11
CO ₂	3.10		1.01	2.08	0.08		6.60	1.60	2.84	1.25		0.40	
总和	99.29	99.85	99.63	99.31	99.20	98.93	99.89	99.80	99.75	99.64	99.10	99.93	100.01
Sr	714	106	183	86.8	137	42.3	188.8	211	597	207	127.7	71.63	71.2
Rb	63.4	8.5	30.9	18.1	13.7	50.1	13.9	10.7	12.6	8.76	3.47	17.25	23.2
Ba	136	136	362	209	144	513	299	84.6	227	214	479	565	53.0
Th	0.947	4.29	4.22	2.45	3.90	20.8	3.76	2.45	2.85	2.92	3.43	7.66	5.84
Ta	0.604	0.474	0.806	0.492	0.369	1.41	0.26	0.298	0.349	0.264	0.29	0.82	0.520
Nb	24	12	18	10	10	27	9	8	8.6	12	7	10	10
Zr	78.1	209	290	318	175	296	122	139	136	65	157	138	153
Hf	3.86	6.17	7.01	3.36	3.88	15.7	3.14	3.37	3.01	2.6	1.83	4.54	4.47
La	17.4	26.4	46.4	26.1	23.2	74.5	34.4	16.8	16.5	13.2	9.33	12.6	30.3
Ce	35.4	54.9	101	64.3	47.9	158	63.6	37.8	30.0	23.4	21.8	23.8	58.3
Nd	25.8	25.3	53	36.7	24.2	70.1	29.6	17.4	13.7	15.1	12.5	8.16	19.8
Sm	7.4	5.54	11	8.02	4.77	14.4	5.72	4.05	2.92	3.11	2.48	2.21	3.15
Eu	2.63	1.80	3.72	3.24	1.44	1.93	1.19	1.33	0.999	0.915	0.63	0.81	0.664
Tb	1.63	1.02	1.96	1.45	0.896	2.48	0.81	0.803	0.595	0.522	0.36	0.60	0.405
Yb	4.03	3.63	6.68	4.54	3.35	9.67	3.04	3.10	1.95	2.14	1.24	1.80	1.54
Lu	0.593	0.547	1.02	0.58	0.477	1.55	0.46	0.507	0.293	0.315	0.16	0.25	0.247
Y	19	32	64	39	24	83	16	26	15	19.6	7	12	10
(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i			0.704198		0.705388		0.707365	0.706917	0.707903	0.707882			
			± 75		± 66		± 16	± 33	± 15	± 48			
ε _{Nd} (t)			5.03		2.09		-5.87	-5.01	-5.74	-6.09			
			(t = 1475 ± 12Ma)				(t = 736.43 ± 16.82Ma)						

注: Mg=100mg/(Mg+Fe); 岩石主元素化学分析(%); 中国科学院地球化学研究所李荪蓉; 微量元素分析(10⁻⁶); Nb, Y 为国家地质测试中心宋尔良, 其余为中国科学院高能物理研究所中子活化分析室韩松、黄忠祥; Sr-Nd 同位素: 中国科学院地质研究所黄萱

3.2 3个旋回基性火山岩岩石地球化学特征

3个旋回中的基性火山岩在成分上虽有共同特点, 但差异亦十分明显。由图3可知, 一、三旋回基性火山岩MgO含量高, 二旋回基性火山岩MgO含量低。第一、二旋回的基性火山岩ΣREE含量较高, 分别为 94.9×10^{-6} 及 $71.6 \times 10^{-6} \sim 147.4 \times 10^{-6}$; 第三旋回基性火山岩ΣREE为 $54.5 \times 10^{-6} \sim 138.8 \times 10^{-6}$ 。第一旋回基性火山岩属于碱性系列, Nb/Y比值大于1.24; 第二、三旋回基性火山岩Nb/Y比值小于0.7, 属非碱性系列^[6], 按 $\text{SiO}_2 < \text{FeO} > / \text{MgO}$ 关系^[7]为拉斑玄武岩系

列。在La/Sm-La图上, 基性火山岩样品点均沿斜线分布, 代表一个部分熔融系列; 酸性火山岩沿另一斜线分布, 代表另一部分熔融系列。从第一至第二、三旋回, 基性火山岩从碱性玄武岩系列演变为拉斑玄武岩系列, 表明部分熔融作用伊始, 产生部分熔融程度低的碱性玄武岩浆; 尔后部分熔融程度增强, 产生拉斑玄武岩浆。在属于拉斑玄武岩Σ系列的二、三旋回基性火山岩中, 第二旋回岩石的轻稀土富集程度以及Zr、P、Y、Ti均高于第三旋回基性火山岩, 说明第二旋回基性火山岩熔融程度较第三旋回基性火山

表 2 碧口群火山岩特征主量元素、微量元素及同位素变化范围
Table 2 Variation ranges of characteristic major element, trace element
and isotope in volcanic rocks of the Bikou Group

项 目	第一旋回		第二旋回		第三旋回	
	基性火山岩(1)	酸性火山岩(3)	基性火山岩(7)	酸性火山岩(4)	基性火山岩(7)	酸性火山岩(6)
SiO ₂ (wt%)	48.8	65.36~67.93	44.88~54.57	68.46~68.69	45.29~55.10	68.37~75.67
TiO ₂ (wt%)	1.75	0.50~0.60	0.96~2.45	0.30~1.30	0.62~2.45	0.10~1.33
MgO(wt%)	5.10	0.32~0.54	2.31~6.88	0.21~0.60	2.50~6.90	0.32~0.50
ΣREE(10 ⁻⁶)	94.9	88.3~175.92	71.6~147.4	55.8~180.1~332.6	54.5~138.8	48.5~196.5
δEu	0.98	0.77~1.05	0.81~1.21	0.42~0.83	0.58~1.05	0.073~0.67~1.02
Zr(10 ⁻⁶)	78.1	71.3~209	92.1~290	44.4~316	65~251	96.8~157
Y(10 ⁻⁶)	19.0	8~32	4~24	4.8~83	15~34	7~26.5
Nb(10 ⁻⁶)	24.0	4.2~12	8~18	3.6~27	8~21	4.8~10
Cr(10 ⁻⁶)	65.3	10~15.8	9.01~287	8.71~33.3	15.1~284	2.73~48.9
Ni(10 ⁻⁶)	103	24.6~50	59.8~80.1	15.1~38.2	57.4~141	7.23~61.9
(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i			0.705388±66~ 0.704198±75		0.706917±33 0.707903±13	0.707923±100 0.707923±3
ε _{Nd} (t)			2.09~5.03	3.77~4.87	-6.09~-5.01	

注:括号内的数字为样品数

岩要低。3个旋回基性火山岩的δEu值多变化于0.8~1.05之间,反映出碧口群3个旋回基性火山岩浆在形成演化的过程中结晶分异作用不明显,仅在第三旋回中δEu为0.58,表明其有一定的结晶分异作用,导致出现少量角斑岩。

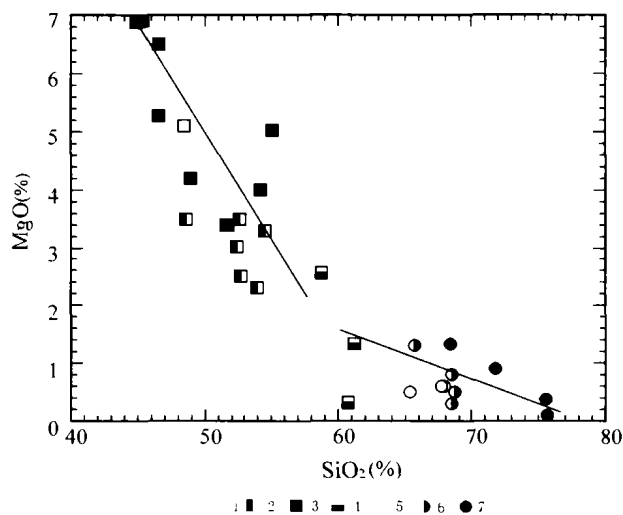


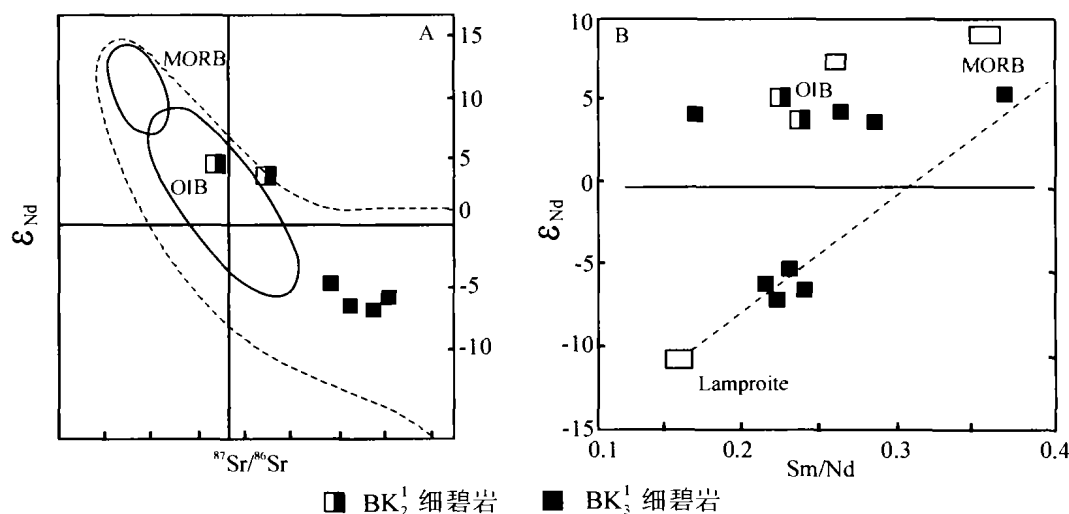
图3 碧口群火山岩MgO-SiO₂相关图

Fig. 3 MgO-SiO₂ diagram of volcanic rocks
of the Bikou Group

1—第一旋回基性火山岩;2—第二旋回基性火山岩;3—第三旋回基性火山岩;4—第三旋回中性火山岩;5—第一旋回酸性火山岩;6—第二旋回酸性火山岩;7—第三旋回酸性火山岩

第二旋回基性火山岩的(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i=0.7042~0.7054, ε_{Nd}(t)=2.09~5.03(同位素计算采用本次工作所分析的Sm-Nd等时线年龄:t=1475±12 Ma)。在ε_{Nd}-⁸⁷Sr/⁸⁶Sr图(图4A)中,其成分点落入OIB区;在ε_{Nd}-Sm/Nd图(图4B)中,其成分点亦落入OIB区,证明其源区为相似于洋岛玄武岩的富集地幔柱源。与McDonough指出的软流圈地幔柱源的同位素特征^[8]对比,碧口群第二旋回基性火山岩浆组分主要来源于地幔柱部分熔融,大陆岩石圈混染作用轻微。第三旋回基性火山岩,作者获得的同位素年龄有两组:一组t=(987.83±3.26)Ma(样品采于甘肃枫相院),样品在图4A中投入OIB及岩石圈-软流圈混合线的上方;另一组t=(736.43±16.82)Ma(样品采于略阳号家沟),样品在图4A中投入大陆岩石圈地幔区,在图4B中投入岩石圈-软流圈混合线上。这说明第三旋回基性火山岩浆作用早期仍以地幔柱熔体为主体的岩浆,但已开始有少量岩石圈地幔熔体的混染。岩浆作用晚期,岩石圈地幔熔体的混染加强。

在微量元素MORB标准化配分图上(图5),碧口群二、三旋回基性火山岩均富集LREE和LIL,略亏损Nb、Ta,但其MORB标准化值均呈正异常(大于1),这与俯冲带岩浆特有的Nb、Ta的MORB标准化值呈负异常(小于1)完全不同。整体上呈一“大隆起”型,具大陆拉斑玄武岩的特点^[9]。在适合

图4 碧口群基性火山岩 $\epsilon_{\text{Nd}}-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 变异图(A)和 $\epsilon_{\text{Nd}}-\text{Sm}/\text{Nd}$ 变异图(B)Fig. 4 $\epsilon_{\text{Nd}}-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ diagram (A) and $\epsilon_{\text{Nd}}-\text{Sm}/\text{Nd}$ diagram (B) of basic volcanic rocks of the Bikou Group

A图虚线示据地幔捕虏体确定的大陆岩石圈地幔的Sr-Nd同位素(据参考文献[12])

B图虚线为Ellam等(1991)的岩石圈-软流圈混合线

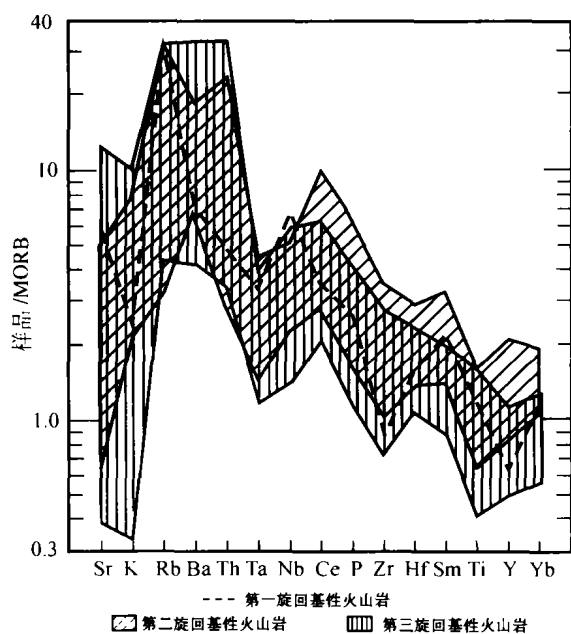


图5 碧口群火山岩微量元素MORB标准化配分图

Fig. 5. MORB-normalized trace element patterns of basic volcanic rocks of the Bikou Group

于判别古老变质玄武岩形成环境的Zr/Y-Zr图中,这些基性火山岩全部落入板内区;在Th/Ta-Hf/Ta图解中(图6)^[10]落入大陆裂谷区。因此,碧口群基性火山岩具有大陆板内裂谷火山岩岩石地球化学特点。

3.3 3个旋回酸性火山岩岩石地球化学特征

3个火山旋回中酸性火山岩的 SiO_2 、 TiO_2 、 MgO 含量平均值近似,活泼元素的氧化物 Na_2O 、 K_2O 的含量亦相近,因此,3个旋回中酸性火山岩浆的成分是相似的。3个旋回酸性火山岩微量元素数值交叉,一些特征数值如 ΣREE 、 δEu 均相近;在La/Sm-La图上显示3个旋回酸性火山岩是通过程度不同的部分熔融作用形成的,每一火山旋回内的酸性火山岩浆在形成和演化过程中既有部分熔融作用亦有分离结晶作用。本区酸性火山岩的微量元素特征与上地壳角闪岩相及下地壳麻粒岩相的平均值^[11]十分相似,且第三旋回酸性火山岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为0.7079,表明酸性火山岩为地壳部分熔融作用的产物。

4 地质构造意义

碧口群火山岩形成于大陆裂谷环境,是裂谷拉张速度较快时火山作用的产物。主要表现在:(1)碧口群每一旋回火山岩系基性火山岩和酸性火山岩均很发育,中性岩很少,且基性和酸性火山岩分别来自于地幔和地壳源区,具双来源特征,是一种典型的大陆裂谷双峰式火山岩系组合特征^[12-14];(2)每一旋回的基性和酸性火山岩均由熔岩和火山凝灰岩组成,火山凝灰岩普遍发育,说明火山岩浆喷出以喷溢和爆发作用为主,不是深海环境下的产物;(3)第一旋

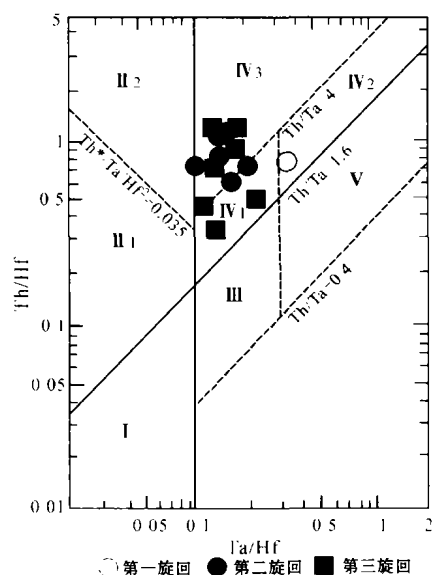


图6 碧口群基性火山岩构造环境Th/Hf-Ta/Hf判别图^[9]

Fig. 6 Th/Hf-Ta/Hf discrimination diagram

of the tectonic setting of volcanic rocks of the Bikou Group

I—板块发散边缘 N-MORB 区; II—板块汇聚边缘 (II₁—大洋岛弧; II₂—陆缘岛弧及陆缘火山弧)玄武岩区; III—大洋板内洋岛, 海山玄武岩及 T-MORB, E-MORB 区; IV—大陆板内玄武岩区 (IV₁—陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区; IV₂—陆内裂谷碱性玄武岩区; IV₃—大陆拉张带或初始裂谷玄武岩区; IV₄—大陆拉张带或初始裂谷玄武岩区; IV₅—地幔热柱玄武岩

回基性火山岩为碱性系列, 第二、三旋回为拉斑玄武岩系列, 整个基性火山岩是由碱性和拉斑两个岩石系列组成的; (4) 基性火山岩形成于板内构造环境, 第二、三旋回基性火山岩具大陆板内拉斑玄武岩岩石地球化学特点; (5) 在历经构造变动后, 现今碧口群火山岩系仅为残块, 但分布面积仍近万余平方公里, 可见当时火山喷发量非常巨大。以上特点均与Barberi等总结的拉张速度较快时大陆裂谷火山岩系特点^[13]相同。它不同于以碱性和拉斑玄武岩为主、缺少长英质火山岩的洋岛双峰式火山岩, 不同于以钙碱性岩石为主的岛弧弧间裂谷双峰式火山岩或LREE亏损或略富集的具洋岛及岛弧火山岩双重特点的弧后扩张初期阶段的火山岩^[15], 也不同于以拉斑玄武岩为主含少量酸性或碱性火山岩的大陆溢流玄武岩^[11]。

碧口群火山岩岩浆的形成与地幔柱作用密切相关。中元古代大陆裂谷作用伊始, 地幔柱上涌, 产生部分熔融程度低的碱性玄武岩浆, 即第一旋回下部基性火山岩。基性岩浆上升至陆壳, 引起地壳熔

融, 产生酸性岩浆。尔后, 裂谷拉张强度增大, 产生部分熔融程度高的拉斑玄武岩浆, 即第二旋回基性火山岩, 岩浆主要来源于地幔柱的部分熔融。当时裂谷拉张强度大, 岩浆上升快, 受岩石圈地幔的混染作用较小。该基性岩浆上侵也引起地壳的熔融, 产生酸性岩浆及凝灰岩。裂谷作用后期, 由于受地幔柱头长期顶撞和加热, 岩石圈底部熔融物增多, 形成了地幔柱熔体与岩石圈熔体混合的岩浆, 即第三旋回下部的基性火山岩。这期基性火山岩浆上侵同样诱发地壳发生部分熔融, 形成大量酸性岩浆。

碧口群火山岩系处于扬子地块北缘, 其发育表明中元古代—新元古代扬子地块北缘处于大陆拉张环境, 同时地幔热柱活动, 与之相伴的火山作用成为中—新元古代秦岭地壳增生的主要原因^[15]。已有的研究表明, 震旦纪至早奥陶世为秦岭造山带最大扩张期^[1,16], 因此碧口群所代表的中—新元古代大陆拉张作用可能是这一扩张作用的先兆^[17,18]。

参考文献:

- [1] 张国伟, 孟庆任, 赖绍聪. 秦岭造山带结构构造[J]. 中国科学(B辑), 1995, 25(5): 994~1003.
- [2] 赵祥生, 马少龙, 邹湘华, 等. 秦岭碧口群时代、层序、火山作用及含矿性研究[J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 1990, 29: 1~28.
- [3] 陶洪祥, 何恢亚, 王全庆, 等. 扬子板块北缘构造演化史[M]. 西安: 西北大学出版社, 1993.
- [4] 王根宝. 陕西省勉略宁地区碧口群基岩构造缝合带的发现及其地质意义[J]. 陕西地质科技情报, 1995, 20(1): 13~26.
- [5] 夏林圻, 夏祖春, 任有祥, 等. 祁连山—秦岭山系海相火山岩[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [6] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chem. Geol., 1977, 20: 325~343.
- [7] Miyashiro A. Classification characteristics and origin of ophiolites[J]. J. Geol., 1975, 20: 335~353.
- [8] McDonough W F, McCulloch M T, Sun S S. Isotopic and geochemical systematics in Tertiary-Recent basalts from south-eastern Australia and implications for the evolution of the sub-continental lithosphere[J]. Geochim. Cosmochim. Acta., 1985, 49: 2051~2067.
- [9] Pearce J A. Trace elements characteristics of lavas from destructive plate boundaries[A]. in: Thorpe R S ed. Andesites; Oro-genic andesites and related rocks[C]. Chichester: Wiley, 1982. 525~548.
- [10] 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的Th/Hf-Ta/Hf图解判别[J]. 岩石学报, 2001, 17(3): 413~421.

- [11] Weaver B L. Trace element geochemistry of Madras granulites [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1980, 71:271~280.
- [12] Wilson M. *Igneous Petrogenesis*[M]. London: Unwin Hyman, 1989.
- [13] Barberi F, Santacore R, Veret J. Chemical aspects of rift magmatism[A]. in: Palmason G ed. *Continental and oceanic rifts*[C]. Washington: American Geophysical Union, 1982. 223~258.
- [14] 钱青. 双峰式火山岩套形成的地球动力学环境[J]. *地学前缘*, 1998, 5(3): 104.
- [15] 夏林圻,夏祖春,徐学义. 北祁连山海相火山岩岩石成因[M]. 北京:地质出版社, 1996. 1~105.
- [16] 张国伟,张宗清,董云鹏. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义[J]. *岩石学报*, 1995, 11(2): 101~114.
- [17] 夏林圻,夏祖春,徐学义. 南秦岭中一晚元古代火山岩性质与前寒武纪大陆裂解[J]. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(3): 237~243.
- [18] 徐学义,夏祖春,夏林圻. 南秦岭板内火山作用特征及构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20(3): 255~262.

Volcanic cycles of the Bikou Group and their tectonic implications

XU Xueyi XIA Zuchun XIA Linqi

(Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The study of volcanic rocks of the Bikou Group concerns the problem of the Meso- and Neoproterozoic tectonic system on the north margin of the Yangtze block. The volcanic rocks of the Bikou Group were previously considered as a component part of an ophiolite suite. Based on detailed field observations and indoor petrological and geochemical studies, the volcanic rocks of the Bikou Group are divided into three volcanic cycles, and each cycle consists of basic volcanic rocks (spilite or spilitic tuff) in the lower part and acid volcanic rocks (quartz keratophyre or quartz keratophyric tuff) in the upper part. The basic volcanic rocks are rich in LREE and LIL. Two magma series can be identified, namely, the alkali basalt magma series and the tholeiitic magma series. The basic volcanic rocks of the first cycle belong to the alkali basalt magma series and those of the second and the third cycles the tholeiitic magma series. The basic volcanic magma was derived from the mantle plume source similar to the OIB source and that of the third cycle underwent strong contamination with the lithospheric mantle; the acid volcanic rocks are the product of the anatexis of the crust. The volcanic rocks of the Bikou Group are of the typical bimodal volcanic rocks formed in a continental rift and is the product of continental extension on the north margin of the Meso- to Neoproterozoic Yangtze block. This extension was the precursor of large-scale spreading of the Qinling orogenic belt that was initiated in the Sinian.

Key words: West Qinling; Bikou Group; volcanic cycle; bimodal volcanic rocks; continental rift