

文章编号: 1000-6524(2004)01-0001-11

扬子板块北缘碧口群火山岩的地球化学 特征及其构造环境

闫全人¹, Andrew D. Hanson², 王宗起¹, 闫臻³, Peter A. Druschke²,
王涛¹, 刘敦一¹, 宋彪¹, 姜春发¹

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. Department of Geosciences, University of Nevada, Las Vegas,
Las Vegas 454010, NV, USA; 3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 碧口群火山岩系中部的基性熔岩以拉斑系列为主, 基性火山岩的 Sr 同位素初始比值和 Nd 同位素初始比值较低, 分别为 0.701 248~0.704 413 和 0.511 080~0.512 341, 大部分样品的 $\epsilon\text{Nd}(t) > 0$, 表明母岩浆主要来自地幔源区。岩石显示明显的富²⁰⁷Pb 及²⁰⁸Pb 特征。在以部分熔融作用为主的演化过程中岩浆发生了一定程度的分异, LREE 大离子亲石元素等表现了从亏损到富集的变化特点。基性熔岩的稀土与微量元素表现出与俯冲碰撞型的弧区玄武岩相同的特点。分析表明: 碧口群火山岩系形成于岛弧环境, 它与横丹群浊积岩系在扬子板块西北缘构筑了一个弧-盆系统, 其时代为新元古代。

关键词: 地球化学; Sr-Nd-Pb 同位素; 碧口群火山岩; 弧-盆系统; 扬子板块; 新元古代

中图分类号: P588.1; P584

文献标识码: A

Geochemistry and tectonic setting of the Bikou volcanic terrane on the northern margin of the Yangtze plate

YAN Quan_ren¹, Andrew D. Hanson², WANG Zong_qi¹, YAN Zhen³, Peter A. Druschke²,
WANG Tao¹, LIU Dun_yi¹, SONG Biao¹ and JIANG Chun_fa¹

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Department of Geosciences,
University of Nevada, Las Vegas, Las Vegas 454010, NV, USA; 3. Institute of Geology and Geophysics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The Bikou volcanic terrane is predominated by tholeiitic marine lavas, with lower initial ratios of Sr and Nd, 0.701 248~0.704 413 and 0.511 080~0.512 341 respectively. Analyses also showed that most samples have negative ϵNd , which indicates that magma was probably derived from the mantle, while those with positive ϵNd perhaps resulted from magmatic contamination. In addition, rocks have significantly higher ²⁰⁷Pb and ²⁰⁸Pb. REE patterns and trace element spider diagrams indicate that magma generated by partial melting gave rise to some extent of differentiation during its evolution. Consequently, LREE and LILE demonstrated variation from depletion to enrichment. Besides, Basic lavas from the Bikou volcanic terrane showed the same characteristics as those from arcs in the background of subduction and collision with the consideration of ratios of

收稿日期: 2003-03-07; 修订日期: 2003-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40172071, 49972074); 国家自然科学基金国际合作交流资助项目(40211120151); 中国地质调查局资助项目(DKD2001002); 973 资助项目(2002CB412608)

作者简介: 闫全人(1964-), 男, 博士, 副研究员, 专业研究领域: 造山带与沉积盆地。

Th/Yb, Th/Nb and Hf/Th. New evidence showed that the Hengdan group is a turbidite terrane filled in a fore-arc basin, and both the Bikou and the Hengdan groups construct an arc_basin system developed on the north margin of Yangtze plate. SHRIMP ages indicated that the arc_basin system developed in the Neoproterozoic.

Key words: geochemistry; isotopes of Sr, Nd and Pb; the Bikou volcanic terrane; arc_basin system; Yangtze plate; the Neoproterozoic

位于扬子板块北缘的碧口群火山岩系是从原碧口系(叶连俊等, 1944)中解体出来的一个构造岩石单元(陶洪祥等, 1993), 也是南秦岭造山带的主要结构组成单元之一。虽已经过近60年的研究, 但对一些重要地质问题, 如碧口群火山岩系形成的构造环境, 仍存在着不同认识, 如岛弧环境说(裴先治, 1989; 夏祖春等, 1989; 赵祥生等, 1990; 张家润, 1990; 陶洪祥等, 1993; 秦克令等, 1994; 王根宝, 1995; 卢一伦等, 1996, 1997; 杨宗让, 1997)、弧内裂谷环境说(董广法等, 1998)、大陆裂谷环境说(夏林圻等, 1996a, 1996b; 丁振举等, 1998; 匡耀求等, 1999; 徐学义等, 2001)、洋中脊和(或)大洋板内说(张二朋等, 1993; 刘国惠等, 1993)、中新元古代基底

说(秦克令等, 1992)和元古宙古陆块说(左国朝, 1984; 张国伟等, 2001)。在详细野外地质调查的基础上, 本文对碧口群火山岩的Sr、Nd、Pb同位素组成及地球化学特征进行了研究, 探讨了该火山岩系形成的构造环境。

1 地质背景

碧口群火山岩系分布在扬子板块北缘的南秦岭地区, 南以平武-青川-阳平关断裂为界, 北界是铜钱坝-枫相院断裂, 西南侧为虎崖关-土城断裂。该火山岩系主要由熔岩和火山碎屑岩组成, 熔岩呈绿色至深绿色, 为水下环境的火山喷溢产物。该岩系呈北东东向展布, 长约230 km, 宽20 km左右(图1)。

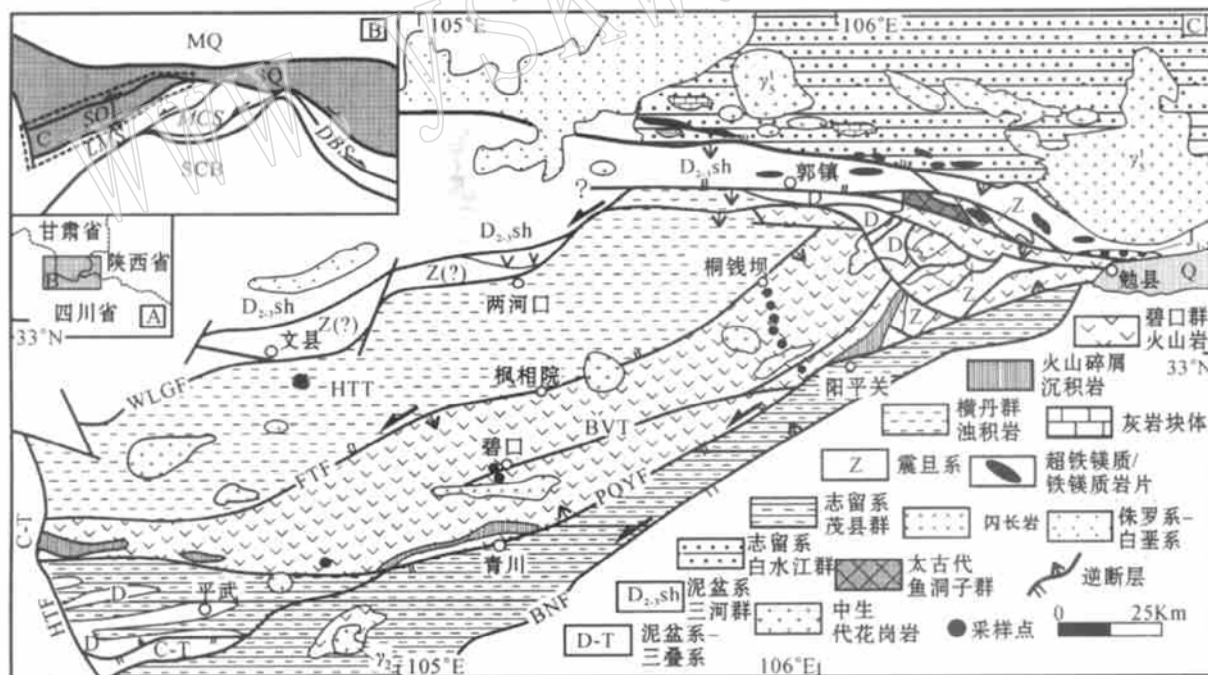


图1 碧口地区地质构造简图[据张二朋等(1992)修测]

Fig. 1 Sketch geological map of Bikou area in the southern Qinling Mountain (revised from Zhang Erpeng *et al.*, 1992)

MQ—中秦岭; SQ—南秦岭; SCB—华南板块; SQL—西南秦岭; LMS—龙门山; MCS—米仓山; DBS—大巴山; HTT—横丹群浊积岩系;

BVT—碧口群火山岩系; HTF—虎崖-土城断裂; WLGF—文县-两河口-郭镇断裂; FTF—枫相院-铜钱坝断裂; PQYF—平武-青

川-阳平关断裂; BNF—北川-南坝断裂

MQ—Middle Qinling; SQ—South Qinling; SCB—South China plate; SQL—Southwest Qinling; LMS—Longmen Mountain; MCS—Micang Mountain; DBS—Daba Mountain; HTT—turbidite of Hengdan Group; BVT—volcanic rocks of Bikou Group; HTF—Huya_Tucheng fault; WLGF—Wenxian_Lianghekou_Guozhen fault; FTF—Fengxiangyuan_Tongqianba fault; PQYF—Pingwu_Qingchuan_Yangpingguan fault; BNF—Beichuan_Nanba fault

区域上, 碧口群火山岩系的岩石组合差异较大: 勉略宁地区各类火山岩均有出露, 而在陇南地区(文县至碧口一带)则主要是细碧岩、玄武岩、安山玄武岩和石英角斑岩, 偏酸性的火山碎屑岩增多。至川西北地区, 出露的熔岩主要是细碧岩, 呈少量夹层产出, 而偏酸性火山碎屑岩则明显增多, 并逐渐占主导。碧口群火山岩的岩石组合及区域变化如下:

①火山熔岩的岩石组合: 细碧岩+玄武岩+安山岩+角斑岩+少量流纹岩。主要发育于勉略宁区及陇南地区, 为典型的海底喷发火山岩系。

②火山碎屑岩的岩石组合: 角砾熔岩+凝灰熔岩+火山角砾岩+凝灰岩。这一岩石组合主要分布于勉略宁区及陇南地区。

③火山碎屑沉积岩的岩石组合: 沉积火山角砾岩+沉凝灰岩+凝灰砂岩+凝灰质粉砂岩+凝灰质千枚岩。这一岩石组合主要见于川西北地区, 变火山熔岩呈少量夹层出现。

碧口群火山岩已发生低绿片岩化浅变质作用(魏春景, 1993), 不同类型岩石的特征如下:

玄武岩: 出露于勉略宁地区和陇南地区, 岩石具变余斑状结构, 杏仁状和枕状构造。变斑晶由斜长石、普通辉石组成, 基质为斜长石、绿泥石、绢云母、绿帘石、钠黝帘石和石英, 少量钠长石。辉石包括普通辉石、透辉石和易变辉石, 蚀变为绿泥石、纤闪石。

细碧岩: 构成碧口群基性熔岩的主体, 主要分布于勉略宁地区。岩石具枕状和残余杏仁构造。岩枕中可见明显的流动冷凝边、过渡带和内核。流动冷凝边具玻晶结构, 内核具填间结构。主要矿物为斜长石和单斜辉石, 另有石英和少量钠长石及黄铁矿。

安山岩: 出露于勉略宁和陇南地区。岩石为绿色、紫色或二者相间。具变余交织结构和变余斑状结构, 基质呈填间结构, 枕状构造。斑晶为斜长石, 一般为中长石($An = 30 \sim 35$), 聚片双晶, 具钠长石化或钠黝帘石化蚀变。基质由斜长石、绿泥石组成。

英安岩: 呈绿色, 风化后为灰绿、灰白色。变质较深者已形成绢云斜长片岩、绿泥斜长片岩和绿泥斜阳起片岩等。岩石具斑状结构、变余斑状结构、残余粒状结构。斑晶由斜长石及部分钠长石组成。基质主要为绿泥石、绢云母、斜长石和石英。

角斑岩: 灰白色, 呈显微鳞片状变晶结构及斑状结构, 平行及片状构造。主要矿物为钠长石(50%~70%)、绿泥石和绢云母, 副矿物有锆石、磷灰石等。斑晶为钠更长石、钠长石。蚀变矿物为绿泥石、绢云

母及白钛矿。角斑岩多出露于勉略宁和陇南地区。

流纹岩: 主要出露于勉略宁地区。岩石呈灰色, 具斑状及显微粒状结构, 基质为晶质显微粒状结构, 片状及平行构造。矿物为钾长石(40%~60%)、钠长石(20%~25%)及石英(3%~5%), 呈半自形粒状、柱状。绢云母化强烈。

2 样品及其处理过程

用于岩石地球化学和 Sr、Nd、Pb 同位素分析的样品采自甘肃南部康县—碧口一带碧口群火山岩系的中部(见图 1)。样品处理过程如下:

新鲜样品破碎后用去离子水和超声波反复洗涤、烘干 3~4 次, 再磨成 200 目粉样。将 40 mg 样品置于 Teflon 溶样器中, 加入 0.3 mL 1:1 HNO₃ 和 1 mL HF 后加盖密封。用超声波振荡 60min 后置于 150 °C 电热板上将样品蒸干, 再加入 0.3 mL 1:1 HNO₃ 和 1 mL HF 后加盖密封并恒温(100 °C)加热 7~10 天。待样品充分溶解后开盖、蒸干, 加入 2 mL 1:2 HNO₃(1 HNO₃:2 Milli-Q 纯化水), 超声波振荡 30min, 恒温(80 °C)加热 24h, 再蒸干, 并用 1% HNO₃ 将样品溶液稀释。取 8 mL 稀释样置于清洗干净的聚乙烯塑料离心管中, 在 Varian VIST ICP-AES 上进行主量元素测试(其中 SiO₂ 和烧失量用重量法分析)。另取上述稀释样 40 g 置于清洗干净的聚乙烯塑料离心管中, 加入同等质量的 20 × 10⁻⁹ Rh 内标溶液, 摇匀, 在 PE Elan 6000 ICP-MS 上进行微量元素测试。12 件主量和微量元素分析在中国科学院广州地球化学研究所 ICP-AES 和 ICP-MS 实验室进行, 测试结果见表 1 和表 2。

Sr、Nd 同位素分析: 将样品置于 Teflon 溶样器中, 加入 HF+HClO₄ 后加盖密封。低温溶解 7 天后用 AG50W × 8(H⁺) 阳离子交换柱分离出纯净的 Rb 和 Sr, 用 AG50W × 8(H⁺) 阳离子交换柱和 P507 萃淋树脂分离出纯净的 Sm 和 Nd, 在动态多接收固体质谱(VG354)上进行同位素测量, 具体测试方法见 Qiao(1988)。Sr 同位素质量分馏用 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.1194 校正, Nd 同位素质量分馏用 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 校正, Rb/Sr 和 Sm/Nd 全流程空白本底均小于 5 × 10⁻¹¹ g。与样品同时分析的国际标样 NBS987 和 NBS607 的测试结果分别为 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ± 2σ = 0.710254 ± 14(n = 8) 和 1.20036 ± 30(n = 6)。对国际标样 La Jolla、BCR_1 和 Shin Estou JNdi_1 的测

表1 碧口群火山岩主量元素分析结果

w_B/%

Table 1 Abundances of major elements of marine lavas from the Bikou volcanic terrane

样号	采样位置	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeOt	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Total [#]	Mg [#]
2000174	康县铜钱坝北	玄武岩	49.60	1.80	15.32	14.48	0.20	4.49	9.08	0.41	4.42	0.18	100	22
2000177	康县铜钱坝北	玄武岩	50.30	1.68	16.16	12.52	0.21	5.78	9.24	0.11	3.80	0.17	100	29
2000199	康县铜钱坝南	玄武岩	46.46	2.05	16.30	13.52	0.17	5.73	13.72	0.30	1.50	0.25	100	27
2000208	康县托河乡南	玄武岩	46.01	3.86	15.35	15.65	0.20	6.77	7.57	0.52	3.53	0.54	100	28
2000209	康县托河乡南	玄武岩	48.06	2.87	13.05	14.80	0.18	7.56	10.53	0.04	2.62	0.29	100	31
2000223	碧口南范坝-庙湾里	玄武岩	55.84	1.14	19.34	7.21	0.11	3.43	6.10	3.37	3.23	0.23	100	30
2000224	碧口南范坝-庙湾里	安玄武岩	58.51	1.29	17.52	6.89	0.10	3.30	5.62	1.16	5.22	0.40	100	30
2000225	碧口南范坝-庙湾里	安山岩	46.40	2.86	13.25	18.19	0.24	6.72	10.16	0.15	1.74	0.29	100	25
2000226	碧口南范坝-庙湾里	玄武岩	48.21	0.15	22.69	4.11	0.06	8.38	13.18	0.02	3.19	0.01	100	64
2000228	碧口南范坝-庙湾里	玄武岩	50.42	0.36	11.65	6.48	0.14	14.16	15.09	0.01	1.67	0.02	100	66
2000230	碧口南范坝-庙湾里	玄武岩	50.44	0.24	18.10	5.73	0.10	10.33	12.26	0.01	2.77	0.02	100	62
2000231	碧口南范坝-庙湾里	玄武岩	50.28	1.82	16.76	12.24	0.17	6.34	6.96	0.88	4.29	0.25	100	31

* 数据经去除烧失量归一化处理, FeOt 为全铁, Mg[#] = 100 × Mg / (Mg + Fe²⁺)。

表2 碧口群火山岩系微量元素分析结果

w_B/10⁻⁶

Table 2 Concentrations of trace elements of marine lavas from the Bikou volcanic terrane

	2000174	2000177	2000199	2000208	2000209	2000223	2000224	2000225	2000226	2000228	2000230	2000231
P	737.9	702.9	1025.9	2213	1231.1	886.5	1555.5	1166.2	66.928	58.576	23.885	966.7
Sc	45.55	44.73	34.93	28.68	31.04	21.68	23.725	43.806	24.535	60.238	45.179	28.066
Ti	9622.7	8566.2	11523.5	21214.7	16349.1	6242.2	7086	15759.8	927.9	1961.4	1424.9	10351.4
V	275.2	296.8	267.5	317.1	288	194.886	151.391	488.035	68.95	203.085	143.491	232.296
Cr	149.6	170.7	143.1	113.5	126.5	108.68	69.522	76.454	724.409	1581.16	956.112	162.4
Mn	1433.9	1575.1	1224.4	1422.5	1273.7	843.1	778.9	1680.2	496.7	999	783.5	1294.2
Co	42.56	39.6	44.88	47.25	47.56	17.738	21.3	62.353	27.243	37.815	34.914	42.653
Ni	67.24	58.09	84.24	65.69	82.84	35.54	36.199	66.888	131.938	225.348	160.01	69.57
Ga	16.98	16.9	20.02	25.75	19.95	22.445	19.353	18.941	10.763	6.427	8.784	20.612
Rb	10.94	2.229	7.257	13.56	0.322	68.434	19.554	5.329	3.948	3.871	3.734	23.01
Sr	39.4	83.31	353.5	102.4	224.5	552.685	594.587	118.583	41.578	18.152	39.695	243.96
Y	34.29	32.05	29.02	34.42	25.74	18.812	21.028	53.171	3.887	9.768	5.479	23.143
Zr	93.68	109.3	150.8	304.3	190.6	235.16	153.739	170.725	29.849	34.024	30.71	137.02
Nb	4.091	4.344	11.03	51.94	16.01	10.582	8.999	7.894	2.224	2.284	2.207	12.07
Ba	164.6	59.94	115.6	125.7	11.44	972.2	383.196	166.749	15.158	4.781	5.221	262.452
La	5.226	5.872	10.46	41.57	13.43	19.339	20.968	7.255	0.319	0.36	0.175	18.473
Ce	15.8	17.01	27.87	93.18	36.47	43.329	47.342	20.943	1.076	1.741	0.947	41.26
Pr	2.526	2.706	4.01	12.45	5.393	5.688	6.42	3.484	0.221	0.431	0.248	5.528
Nd	12.6	13.49	18.79	50.67	24.21	24.681	28.462	19.808	1.523	2.569	1.645	24.51
Sm	3.913	4.155	5.047	10.58	6.308	4.859	5.694	6.214	0.585	0.903	0.572	5.431
Eu	1.365	1.499	2.065	3.331	1.854	1.348	1.643	1.952	0.192	0.318	0.179	1.662
Gd	5.055	5.3	5.756	9.104	6.284	4.496	5.194	8.967	0.804	1.712	1.097	5.521
Tb	0.921	0.951	0.992	1.341	1.029	0.631	0.746	1.464	0.109	0.275	0.156	0.807
Dy	5.499	5.638	5.609	7.147	5.427	3.563	4.004	9.36	0.714	1.773	1.068	4.674
Ho	1.177	1.199	1.105	1.285	1.013	0.668	0.766	1.987	0.133	0.357	0.194	0.888
Er	3.101	3.234	2.847	3.125	2.516	1.815	2.089	5.758	0.372	0.866	0.501	2.356
Tm	0.465	0.476	0.415	0.415	0.345	0.268	0.308	0.863	0.064	0.14	0.084	0.348
Yb	3.01	3.008	2.676	2.519	2.198	1.718	1.899	5.516	0.397	0.867	0.551	2.052
Lu	0.454	0.449	0.397	0.357	0.312	0.267	0.292	0.841	0.065	0.136	0.092	0.313
Hf	2.192	2.529	3.465	6.652	4.401	6.02	4.179	4.812	0.494	0.686	0.576	3.666
Ta	0.269	0.288	0.685	3.125	1.037	0.31	0.33	0.389	0.244	0.24	0.239	0.409
Pb	0.53	1.956	5.029	4.863	1.534	4.941	5.174	65.675	1.351	4.194	4.085	6.233
Th	0.34	0.357	1.006	3.863	1.071	3.005	2.79	0.767	0.286	0.29	0.288	2.44
U	0.079	0.087	0.23	0.888	0.33	0.739	0.801	0.213	0.091	0.187	0.084	0.612
ΣREE	61.11	64.99	88.09	237.07	106.79	112.67	125.85	94.38	5.57	12.45	7.51	113.82
Eu/Eu [*]	0.94	0.98	1.17	1.01	0.89	0.87	0.91	0.79	0.87	0.77	0.68	0.92
(Ce/Yb) _N	1.46	1.57	2.89	10.28	4.61	7.01	6.92	1.05	0.75	0.56	0.48	5.59
Th/Yb	0.11	0.12	0.38	1.53	0.49	1.75	1.47	0.14	0.72	0.33	0.52	1.19
Th/Nb	0.08	0.08	0.09	0.07	0.07	0.28	0.31	0.10	0.13	0.13	0.13	0.20
Hf/Th	6.45	7.08	3.44	1.72	4.11	2.00	1.50	6.27	1.73	2.37	2.00	1.50

球粒陨石和原始地幔标准化值采用 Sun & McDonough(1989) 的推荐值。

试结果为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma = 0.511\,862 \pm 7$ ($n=12$)、 $0.512\,633 \pm 9$ ($n=2$) 和 $0.512\,120 \pm 11$ 。对于 Pb 同位素分析, 取粉样(200 目) 150 mg 置于 Teflon 溶样器并用 HF 分解, 采用 HBr 体系, 在 AG1×8 阴离子交换柱上分离、提纯 Pb。用硅胶作发射剂, 在 VG354 固体质谱上测定 Pb 同位素组成, Pb 全流程空白值小于 1×10^{-9} g。与样品同时测试的国际标样 NBS981 的 $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$ 分别为 $0.059\,003 \pm 0.000\,084$ 、 $0.914\,39 \pm 0.000\,17$ 和 $2.164\,41 \pm 0.000\,97$ ($n=6$)。Sr(6 件)、Nd 和 Pb(13 件) 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所和广州地球化学研究所进行, 测试结果见表 3。

3 结果分析

3.1 主量与微量元素

分析结果表明, 碧口群中部火山岩以基性为主 ($\text{SiO}_2 = 46.01\% \sim 52.17\%$), 主要岩石类型为玄武岩, 少量玄武安山岩和安山岩 ($\text{SiO}_2 = 55.84\% \sim 58.51\%$)。 $\text{O}' - \text{Ne}' - \text{Q}'$ 图和 $\text{FeOt}/\text{MgO} - \text{SiO}_2$ 图的判别结果表明: 碧口群中部火山岩的岩石系列以亚碱性的拉斑系列为主(图 2)。另外, 基性熔岩的 CaO 含量较高, 达 15.09%。MgO 和 TiO_2 的含量变化较大, 分别为 3.30%~14.16% 和 0.15%~3.86%。其中, 样品 2000226、2000228 和 2000230 具有较高的 $\text{Mg}^\#$ 值 ($\text{Mg}^\# = 62 \sim 66$) 和低 Ti 含量, 表现了与玻安岩相类似的岩石化学特点。

碧口群中部基性熔岩的稀土元素总量变化很大, 为 $5.574 \times 10^{-6} \sim 237.07 \times 10^{-6}$ (表 2)。大部样品的 Eu 轻度亏损 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.68 \sim 0.98$), 而样品 2000199 和 2000208 的 Eu 则呈轻度富集 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.01 \sim 1.17$)。 δEu 值的变化特点表明: 碧口群火山岩母岩浆在其演化过程中的结晶分离作用很弱, 斜长石结晶程度较低。特征参数 $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ 的变化特征则表明: 碧口群中部基性火山岩的稀土元素分布形式具有 LREE 从亏损向富集的变化特点(图 3a、b、c), $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ 值分别为 0.48~0.75、1.05~2.89 和 4.61~10.68。其中, 样品 2000226、2000228 和 2000230 表现为 LREE 亏损, 反映了形成这些类玻安岩的岩浆为初始俯冲阶段的亏损地幔熔融。而其他样品的 LREE 从轻度富集向显著富集的变化表

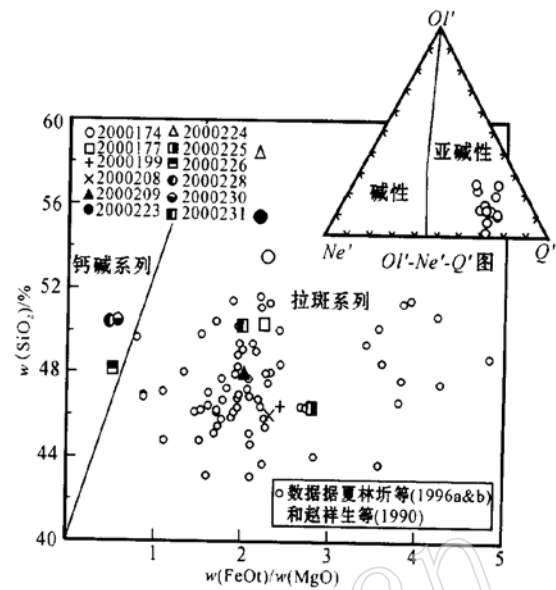


图 2 碧口火山岩 $\text{SiO}_2 - \text{FeOt}/\text{MgO}$ 判别图

Fig. 2 $\text{SiO}_2 - \text{FeOt}/\text{MgO}$ diagram of Bikou lavas

明: 随着俯冲作用的进行, 地壳混染作用增强, 岩浆源于混染地幔熔融。

微量元素也具相似的变化特点: 大离子亲石元素(LILE)从亏损向显著富集变化(图 3d、e、f)。在 LILE 亏损或轻度富集的微量元素配分图中, 具明显 Ba、La、Ce 的低谷, 而 Ta 和 Nb 相对较为富集(图 3d)。在 LILE 中等富集和显著富集的微量元素配分图中, Ta、Nb 呈明显的低谷(图 3e、f), 显示了典型弧火山岩的特征。全部样品均表现了 Pb 含量高的特点。

碧口群中部基性火山岩的特征值 $\text{Th}/\text{Yb} = 0.11 \sim 1.75 (> 0.1)$ 、 $\text{Th}/\text{Nb} = 0.07 \sim 0.35 (> 0.07)$ 和 $\text{Hf}/\text{Th} = 1.30 \sim 7.08 (< 8)$ (见表 2), 表现了与俯冲碰撞型的弧区玄武岩(Condie, 1989)相同的特点。

3.2 Sr、Nd、Pb 同位素组成特征

除样品 2000231 的 Sr 初始比值(0.710 789)略高外, 碧口群中部基性火山岩的 Sr 同位素初始比值相对较低, 为 0.701 248~0.704 413。Nd 初始比值为 0.511 080~0.512 341。大部分样品 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值 > 0 , 表明火山岩的母岩浆主要来自地幔源区, 部分样品的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值 < 0 (如 2000197、231 和 400), 可能是岩浆作用过程中地壳混染造成的。总体上, 岩浆源区接近 EM I 型地幔源区(图 4)。所测样品都显示了明显富 ^{207}Pb 及 ^{208}Pb 的特征, 大部分样品位于北半

表 3 碧口群火山岩的 Sr, Nd 和 Pb 同位素组成
Table 3 Correlated Sr, Nd and Pb isotopes of lavas from the Bikou volcanic terrane

样品	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ	I _{Sr}	I _{Nd}	ε _{Nd}	t _{DM1} /Ma	f _{Sm/Nd}	w(Th)/10 ⁻⁶	w(U)/10 ⁻⁶	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	2σ	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	2σ	注
2000174				0.1870	0.512997	14		0.512077	7.9	874	-0.05	0.34	0.079	17.109	0.046	15.405	0.046	36.707	0.055	a
2000177				0.1855	0.512944	14		0.512032	7.1	1112	-0.06	0.357	0.087	16.860	0.021	15.387	0.026	36.561	0.022	a
2000197				0.1955	0.512041	14		0.511080	-11.6	9058	-0.01	3.508	0.342	16.823	0.045	15.334	0.048	35.326	0.048	a
2000199				0.1618	0.512748	14		0.511953	5.5	1179	-0.18	1.006	0.230	17.185	0.043	15.380	0.048	36.788	0.044	a
2000208				0.1257	0.512465	11		0.511847	3.4	1186	-0.36	3.863	0.888	18.064	0.050	15.405	0.060	38.060	0.067	a
2000209				0.1569	0.512653	12		0.511881	4.1	1332	-0.20	1.071	0.330	18.622	0.041	15.516	0.040	37.910	0.034	a
2000224	0.0923	0.704471	20	0.1296	0.512587	10	0.703483	0.511950	5.5	1020	-0.34	2.790	0.801	17.631	0.022	15.403	0.025	36.833	0.025	b
2000225	0.0454	0.704899	20	0.2041	0.513005	12	0.704413	0.512001	6.5	2292	0.04	0.767	0.213	16.571	0.088	15.328	0.131	35.896	0.118	b
2000226	0.0617	0.703211	20	0.2166	0.513406	16	0.702550	0.512341	13.1	12935	0.10	0.286	0.091	16.952	0.151	15.482	0.167	36.603	0.158	b
2000228	0.0339	0.703534	36	0.2634	0.512926	10	0.703171	0.511631	-0.8	691	0.34	0.290	0.187	16.971	0.060	15.512	0.075	36.590	0.087	b
2000230	0.1309	0.702650	20	0.2817	0.513663	17	0.701248	0.512278	11.9	1149	0.43	0.288	0.084	17.023	0.064	15.538	0.109	36.782	0.095	b
2000231	0.2369	0.713325	17	0.1371	0.511974	12	0.710789	0.511300	-7.3	2330	-0.30	2.440	0.612	16.574	0.055	15.570	0.084	37.292	0.082	b

a—样品测试在中科院广州地球化学研究所进行; b—样品测试在中科院地质与地球物理研究所进行。

1) I_{Sr}, I_{Nd}, ε_{Nd}(t) 根据 t = 846 Ma (SHRIMP Zircon U-Pb age) 计算;

2) Sr, Nd 和 Pb 同位素校正所用参数:

$$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{GUR}} = 0.1967, \quad ^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{GUR}} = 0.512638, \quad ^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{DM}} = 0.2137, \quad ^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{DM}} = 0.51315 \text{ (Peucat et al., 1988)}, \quad \lambda_{\text{Sm}} = 6.54 \times 10^{-12} \text{ (Lugmair \& Marti, 1978)}, \quad \lambda_{\text{U}} = 1.42 \times 10^{-11}, \quad \lambda_{\text{S}} = 0.98485 \times 10^{-9} \text{ (}^{235}\text{U 衰变常数)}, \quad \lambda_{\text{S}} = 0.155125 \times 10^{-10} \text{ (}^{238}\text{U 衰变常数)}, \quad \lambda_{\text{Th}} = 0.49475 \times 10^{-10} \text{ (}^{232}\text{Th 衰变常数) (Steiger \& Jager, 1977)}.$$

3) Sr, Nd 和 Pb 同位素校正所用公式:

$$\begin{aligned} \epsilon_{\text{Nd}}(t) &= [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{GUR},t} / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM},t} - 1] \times 10^4, \\ (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{GUR},t} &= 0.512638 - 0.1967 \times (e^{\lambda t} - 1), \\ (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t &= (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{sample, today}} - (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_{\text{sample, today}} \times (e^{\lambda t} - 1), \\ (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t &= (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{sample, today}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{sample, today}} \times (e^{\lambda t} - 1), \\ t_{\text{DM}} &= 1/\lambda \times \ln \{ [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{sample, today}} / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM, today}}] \div [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{sample, today}} / (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM, today}}] + 1 \}, \\ (^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{sample, initial}} &= (^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{sample, today}} - (^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{sample, today}} \times (e^{\lambda_7 t} - 1), \\ (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{sample, initial}} &= (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{sample, today}} - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{sample, today}} \times (e^{\lambda_6 t} - 1), \\ (^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{sample, initial}} &= (^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{sample, today}} - (^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{sample, today}} \times (e^{\lambda_8 t} - 1), \end{aligned}$$

t = 846 Ma (SHRIMP 年龄)。

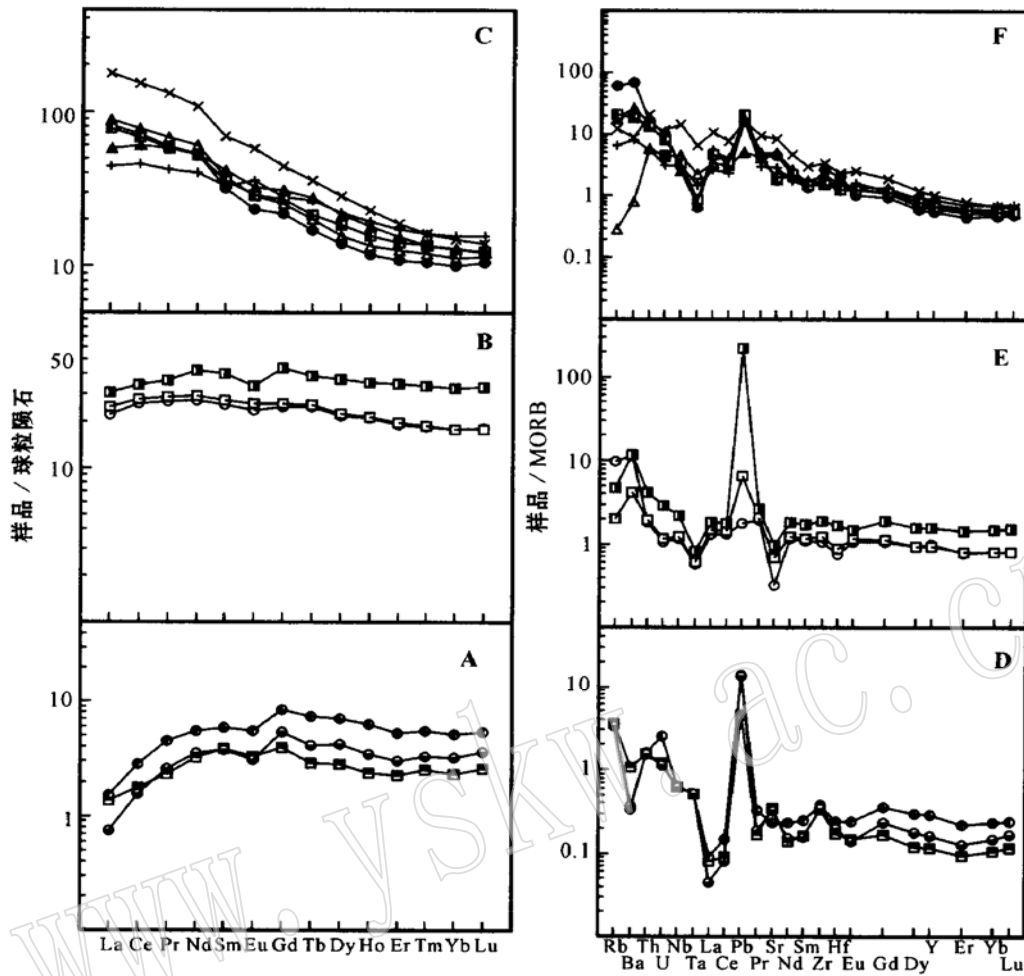


图 3 球粒陨石标准化稀土元素分布型式和 MORB 标准化微量元素配分型式
 Fig. 3 Chondrite normalized REE & primitive mantle normalized trace element patterns
 图例同图 2, REE 和微量元素标准化数据据 Sun *et al.* (1989)
 The legend are same as those in Fig. 2, the data of chondrite and MORB are from Sun *et al.* (1989)

球参考线(NHRL)之上(图 5), 而且数据分布很集中, 暗示了岩浆源区组分的均一性。

4 讨论与结论

如前所述, 碧口群火山岩以基性为主, MgO、TiO₂ 和 CaO 等主量元素含量变化明显。其中高 Mg (Mg[#] = 62~ 66)、低 Ti (0.15% ~ 0.36%) 的基性火山岩表现了与玻安岩类火山岩相似的地球化学特征。这种类玻安岩的火山岩在碧口群中的存在具有重要意义。研究表明, 大洋板块俯冲的开始阶段, 主要由俯冲带地幔楔部分熔融生成贫 TiO₂ (< 0.3%)、富 MgO (> 9%) 的母岩浆, 形成低 Ti、高 Mg 玻安岩 (Sobolev *et al.*, 1994; Danyushevsky *et al.*, 1995;

Edward, 1995, 1999)。随着俯冲作用的加强, 当有大洋沉积物和流体甚至是陆壳物质加入到地幔楔中并参与熔融(即源区发生混染)时, 岩浆逐渐向 TH 系列和 CA 系列演化, 并生成正常的岛弧 TH 或 CA 系列火山岩 (Brown *et al.*, 1999; Tatsumi *et al.*, 2001)。由此分析, 碧口群火山岩系中的类玻安岩的火山岩可能是大洋板块俯冲开始阶段的岩浆活动产物, 代表该地区俯冲碰撞作用的开始。而其他中-高 Ti、低 Mg 基性海相熔岩则是岩浆进一步演化的产物。

碧口群火山岩 LREE 和 LILE 从亏损向富集变化特点(图 3)也反映了岩浆源区的差异, 即源区具有从亏损地幔部分熔融源区向混染地幔熔融源区演化的趋势。较低的 Sr 和 Pb 同位素比值和大部分样品

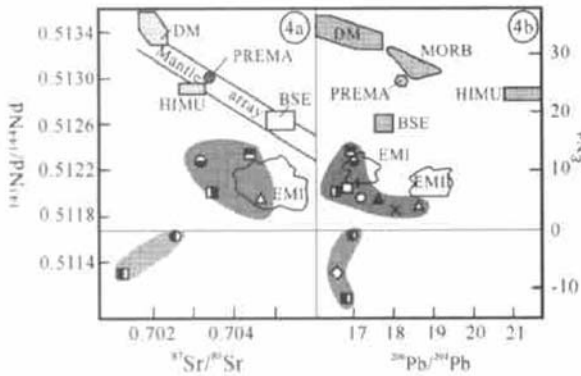


图 4 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (4a)、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (4b) 同位素谱和图
Fig. 4 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (4a) and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (4b) isotope correlation diagram

数据区域和曲线据 Rollinson (1993); mantle array—地幔阵列; DM—亏损地幔; PREMA—原始地幔; EM I 和 EM II—富集地幔; BSE—总硅酸盐地球; HIMU—高 U/Pb 比地幔; 图例同图 2
The region and curves are from Rollinson (1993); DM—depleted mantle; PREMA—primitive mantle; EM I and EM II—enriched mantle; BSE—bulk silicate earth; HIMU—mantle with high U/Pb ratio; the legend are same as those in Fig. 2

$\epsilon\text{Nd}(t)$ 值 > 0 表明碧口群火山岩的母岩浆主要来自地幔源区, 而部分样品的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值 < 0 则表明岩浆演化过程存在地壳混染。总体上, 碧口火山岩的岩浆源区近似 EM I 型地幔源区 (图 4)。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 谱和图上, 数据点比较集中, 显示了源区成分的均一性。Davidson 等 (1989) 根据 Pb 混染作用提出 3 种弧火山岩形成模式, 并用 Pb-Sr-O 三元同位素谱变图定量判别弧火山岩浆源区的混染程度。在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 谱和图上, 碧口群火山岩均落入低程度混染区域, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 增加明显,

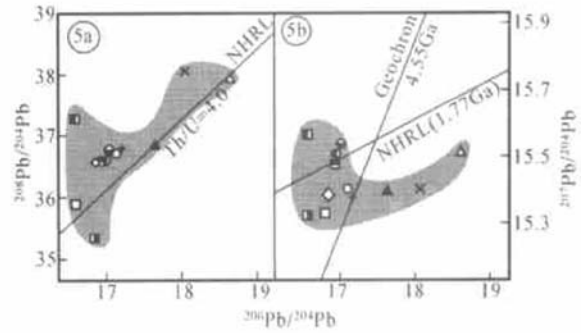


图 5 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (5a)、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (5b) 同位素谱和图

Fig. 5 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (5a) and $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (5b) isotope correlation diagram

数据区域和曲线据 Rollinson (1993); NHRL—北半球参考线; Geochron—4.55 亿年地球参考线; 图例同图 2

The region and curves are from Rollinson (1993); NHRL—northern hemisphere reference line; Geochron—455 Ma earth reference line; the legend are same as those in Fig. 2

而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 增加不显著 (图 6a), 表明碧口弧火山岩形成于由亏损地幔衍生的岩浆, 混染作用主要由俯冲下插的洋壳片体 (MORB) 的混入引起。另外, δEu 值和 $\text{La}/\text{Sm} - \text{La}$ 判别图 (图 6b) 也表明: 碧口火山岩母岩浆在其演化过程中的结晶分离作用很弱, 以部分熔融为主。这种低程度混染、低程度结晶分异的岩浆源区特征以及形成以拉斑系列为主的海相熔岩组合说明碧口群火山岩为一个低成熟度的火山弧, 与主量和微量元素所反映的岩浆演化特征及环境相一致。而且具有从初始弧向大洋弧演化的特点。其

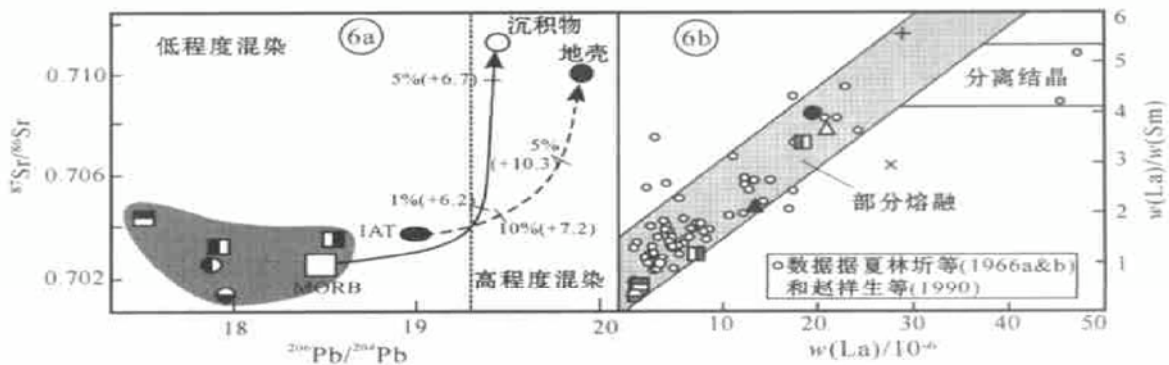


图 6 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 同位素谱和图 (6a) 和 $\text{La}/\text{Sm} - \text{La}$ 判别图 (6b)

Fig. 6 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (6a) and $\text{La}/\text{Sm} - \text{La}$ (6b) diagrams for volcanic rocks from Bikou volcanic terrane

图 6a 数据区域和曲线据 Davidson *et al.* (1989), 括号中数字为氧同位素值; 图 6b 数据区域据李昌年 (1992)
The region and curves in Fig. 6a are from Davidson *et al.* (1989), the number in parentheses are oxygen isotope; the region in Fig. 6b is from Li Changnian (1992)

中, 碧口群中类似玻安岩类的火山岩主要形成于初始岛弧环境(图 7), 而其他则落入演化的大洋弧区域。

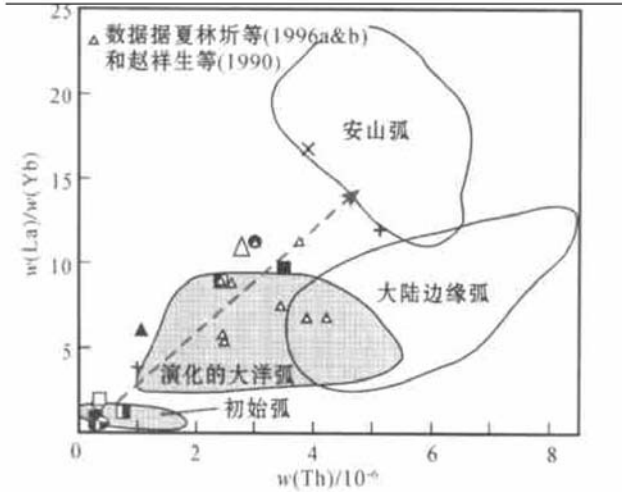


图 7 碧口群火山岩构造环境判别图(据 Condie, 1986)

Fig. 7 Discrimination diagram for tectonic settings of volcanic rocks of Bikou Group (after Condie, 1986)

最新研究表明, 与碧口群火山岩关系紧密的横丹群浊积岩系(见图 1)为一套典型的活动型浊流沉积, 其地层为一总体向上变粗变浅的层序, 由深水盆地相、深水浊积扇相和斜坡相等不同相序组成。古水流方向表明其物源区为南侧的碧口群弧火山岩系, 沉积环境为弧前盆地(闫全人等, 2002; Hanson *et al.*, 2002; Druschke, *et al.*, 2002)。

综上所述, 碧口群火山岩与横丹群浊积岩构筑了一个发育于南秦岭的弧盆系统。最新的 SHRIMP 测年结果表明, 该弧盆体系发育的时代为新元古代, 其中弧火山活动的时限为 846~ 776 Ma(Yan *et al.*, 2003)。

致 射 在数据测试方面, 作者得到中科院地质与地球物理研究所乔广生研究员、许荣华研究员、张任怙研究员、储著银博士, 中科院广州地球化学研究所袁超博士、邓希光博士等的指导与协助。杨进辉博士在同位素数据校正、计算和分析方面给予作者详细指导, 并亲自计算、复核了同位素分析数据。在此, 谨向上述专家的指导与帮助表示诚挚谢意。

References

Brown D and Spadea P. 1999. Processes of forearc and accretionary

complex formation during arc-continent collision in the southern Ural Mountains [J]. *Geology*, 27(7): 649~ 652.

Condie K C. 1986. Geochemistry and tectonic setting of early proterozoic supercrustal rocks in the southwestern United States [J]. *J. Geology*, 94: 845~ 861.

Condie K C. 1989. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: identification and significance [J]. *Lithos*, 23: 1~ 18.

Davidson J P and Harman R S. 1989. Oxygen isotope constraints on the petrogenesis of volcanic arc magmas from Martinique, Lesser Antilles [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 95: 255~ 270.

Danyushevsky L V, Sobolev A V and Falloon T J. 1995. North Tongan high-Ca boninite petrogenesis: The role of Samoan plume and subduction zone-transform fault transition [J]. *J. Geodynamics*, 20(3): 219~ 241.

Ding Zhenju, Yao Shuzhen, Zhou Zonggui, *et al.* 1998. Tectonic attribute of the mid-Proterozoic Bikou terrane [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 22(3): 219~ 226 (in Chinese with English abstract).

Dong Guangfa, Wang Guofu and Liu Jishun. 1998. Tectonic environment analysis of volcanic rocks from the Donggouba group of the Mianlueing region [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 22(2): 163~ 169 (in Chinese with English abstract).

Druschke P A, Hanson A D, Yan Q R, *et al.* 2002. Recognition of a Late Paleozoic arc/fore-arc system developed on the north margin of the South China Plate, southwestern Qinling Mountains, China [J]. *GSA Program with Abstracts*, 34: 142.

Edward J H. 1995. Boninitic and tholeiitic dykes in the Lewis Hills mantle section of the Bay of Islands ophiolite: implications for magmatism adjacent to a fracture zone in a back-arc spreading environment [J]. *Can. J. Earth Sci.*, 32: 2128~ 2146.

Edward J H. 1999. Petrogenesis of boninites from the Betts Cove Ophiolite, Newfoundland, Canada: Identification of subducted source components [J]. *Journal of Petrology*, 40(12): 1853~ 1889.

Hanson A D, Yan Q, Druschke P A, *et al.* 2002. The southwestern Qinling Shan of central China: A Late Paleozoic subduction/accretionary wedge system and continental arc/fore-arc constructed upon the north-facing Devonian passive margin of the South China Block [J]. *GSA Program with Abstracts*, 34: 166.

Kuang Yaoqiou, Zhang Benren and Ouyang Jianping. 1999. Dissection and stratigraphic subdivision of the Bikou group in Northwest margin of the Yangtze craton [J]. *Earth Science Journal of China University of Geosciences*, 24(3): 251~ 255 (in Chinese with English abstract).

Li Changnian. 1991. Petrology of Trace Elements of Igneous Rocks [M]. Beijing: Publishing House of China University of Geosciences, 1~ 195(in Chinese).

Liu Guohui, Zhang Shouguang, You Zhendong, *et al.* 1993. Major Metamorphic Groups and Their Evolutions in the Qinling Orogenic Belt [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~ 190 (in Chinese).

- Lu Yilun, Hunag Jiankun, Du Dinghan, *et al.* 1996. Stratigraphic subdivision and ages of the Bikou group [J]. *Regional Survey of the Qinling*, (1): 1~ 9 (in Chinese).
- Lugmair G W and Marti K. 1978. Lunar initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$: Differential evolution of the lunar crust and mantle [J]. *Earth Planetary Science Letters*, 39: 3 349~ 3 357.
- Peucat J J, Vidal P, Bernard_Griffiths J, *et al.* 1988. Sr, Nd, Pb isotopic systematics in the Archean low to high_grade transition zone of southern India: syn_accretion vs. post_accretion granulites [J]. *J. Geol.*, 97: 537~ 550.
- Pei Xianzhi. 1989. The features and the tectonic significance of rock assemblage in the Bikou group, southern Qinling [J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 11(2): 46~ 56 (in Chinese with English abstract).
- Qiao G. 1988. Normalization of isotopic dilution analysis - A new program for isotope mass spectrometric analysis [J]. *Scientia Sinica (Series A)*, 31(10): 1 263~ 1 268.
- Qin Keling, He Shiping and Song Suguang. 1992. Tectonic evolution and mineralization in Bikou accient island arc belt [J]. *Henan Geology*, 12(4): 304~ 317 (in Chinese with English abstract).
- Qin Keling, Jin Haojia and Zhao Donghong. 1994. Isotopic geochronology and its significance in Bikou terrain, China [J]. *Northwest Geosciences*, 13(2): 97~ 110 (in Chinese with English abstract).
- Rollinson H R. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation* [M]. New York: Longman Scientific & Technical, 1~ 352.
- Sobolev A V and Danyushevsky L V. 1994. Petrology and geochemistry of boninites from the north termination of the Tongan trench: on constraints on the generation conditions of primary high_Ca boninite magmas [J]. *J Petrol.*, 35(5): 1 183~ 1 211.
- Steiger J C and Jager E. 1977. Subcommittee on geochronology: convention of the use of decay constants in geo_and cosmochemistry [J]. *Earth Planetary Science Letters*, 36: 359~ 362.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D, *et al.* *Magmatism in the Oceanic Basins* [C]. Special Publication of Geological Society of London, 42: 313~ 346.
- Tao Hongxiang, He Huiya, Wang Quanqing, *et al.* 1993. Historical Evolution of Tectonics in North Rim of Yangzi Plate [M]. Xi'an: Northwest University Publishing House, 1~ 141 (in Chinese with English abstract).
- Tatsumi Y. 2001. Geochemical modeling of partial melting of subducting sediments and subsequent melt_mantle interaction: Generation of high_Mg andesites in the Setouchi volcanic belt, southwest Japan [J]. *Geology*, 29(4): 323~ 326.
- Wang Genbao. 1995. Identification of a base suture of the Bikou group in Mianxie_Lueyang_Ningqiang area, Shanxi, and its implication [J]. *Scientific and Technological Information of Shanxi Geology*, 20(1): 13~ 26 (in Chinese).
- Wang Zhendong, Huo Xiangguang and Wang Fengxin. 1995. Redefinition of the sequences and ages of the Qinling and Bikou Group complexes [J]. *Regional Geology of China*, (3): 220~ 227 (in Chinese with English abstract).
- Wei Chunjing. 1993. Epidotes from Bikou Group in the Shanxi_Gansu_Sichuan border area and their petrological significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 12(4): 332~ 340 (in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun and Xu Xueyi. 1996a. The confirmation of continental flood basalt of the Proterozoic Xixiang group in the south Qinling Mountains and its geological implications [J]. *Geological Review*, 42(6): 513~ 522 (in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun and Xu Xueyi. 1996b. The characteristics of the mid_late Proterozoic volcanic rocks in south Qinling and continent rifting in the Precambrian [J]. *Science in China (Series D)*, 26(3): 237~ 243 (in Chinese).
- Xia Zuchun, Xia Linqi and Ren Youxiang. 1989. The Study on petrology of marine volcanic rocks of Bikou group from southern Qinling mountains [J]. *Bull. Xi'an Inst. Geol. Min. Res. Chinese Acad. Geol. Sci.*, (25): 97~ 107 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, Xia Zuchun and Xia Linqi. 2001. Proterozoic intraplate volcanic rocks in south Qinling Mountains and their tectonic implications [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 255~ 262 (in Chinese with English abstract).
- Yan Quanren, Wang Zongqi, Hanson A D, *et al.* 2002. The Hengdan turbidite terrane: Fillings in a late Paleozoic forearc basin developed on the passive margin of the Yangtze plate [J]. *Geological Bulletin of China*, 21(8~ 9): 495~ 500 (in Chinese with English abstract).
- Yan Quanren, Wang Zongqi, Hanson A D, *et al.* 2003. SHRIMP age and geochemistry of Bikou volcanic terrane: Implications for Neoproterozoic tectonics on the north margin of the Yangtze craton [J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 479~ 490.
- Yang Zongrang. 1997. Accretionary forearc belt and its evolution in Mid_late Proterozoic, the Bikou area [J]. *Geological and Mineral Information of Shaanxi*, 22(2): 13~ 19 (in Chinese).
- Ye Lianjun and Guan Shicong. 1944. *Geology in mid_south Gansu* [J]. Special Issue of *Geology*, (A19): 1~ 72 (in Chinese).
- Zhang Erpeng, Niu Daoyun, Huo Youguang, *et al.* 1993. *Geologic Tectonic Features of Qinling_Dabashan and Adjacent Regions* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~ 291 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, *et al.* 2001. *Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics* [M]. Beijing: Science Press, 1~ 855 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiarun. 1990. Characteristics of volcanic rocks from the Bikou group and their tectonic settings, Northwest Sichuan [J]. *Journal of Sichuan Geology*, 10(4): 227~ 236 (in Chinese).
- Zhao Xiangsheng, Ma Shaolong, Zou Xianghua, *et al.* 1990. The study of the age, sequence, volcanism and mineralization of Bikou group in Qinling_Dabashan- Volcanic rocks and volcanism [J]. *Bull. Xi'an Inst. Geol. Min. Res. Chinese Acad. Geol. Sci.*, (29): 1~ 128

(in Chinese with English abstract).

Zuo Guochao. 1984. The tectono_formation zone and crustal evolution of Devonian in Western Qinling Range [J]. Gansu Geology, (2): 99 ~ 110 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 丁振举, 姚书振, 周宗桂, 等. 1998. 碧口地体中元古代构造属性 [J]. 大地构造与成矿学, 22(3): 219~ 226.
- 董广法, 王国富, 刘继顺. 1998. 勉略宁地区东沟坝组火山岩的成因浅析 [J]. 大地构造与成矿学, 22(2): 163~ 169.
- 匡耀求, 张本仁, 欧阳建平. 1999. 扬子克拉通北西缘碧口群的解体与地层划分 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 24(3): 251 ~ 255.
- 李昌年. 1991. 火成岩微量元素岩石学 [M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1~ 195.
- 刘国惠, 张寿广, 游振东, 等. 1993. 秦岭造山带主要变质岩群及变质演化 [M]. 北京: 地质出版社. 1~ 190.
- 卢一伦, 黄建坤, 杜定汉, 等. 1996. 碧口群划分及时代归属 [J]. 秦岭区测, (1) (总 44): 1~ 9.
- 裴先治. 1989. 南秦岭碧口群岩石组合特征及其构造意义 [J]. 西安地质学院学报, 11(2): 46~ 56.
- 秦克令, 金浩甲, 赵东宏. 1994. 碧口古岛弧带构造演化与成矿 [J]. 河南地质, 12(4): 304~ 317.
- 秦克令, 何世平, 宋述光. 1992. 碧口群地体同位素地质年代学及其意义 [J]. 西北地质科学, 13(2): 97~ 110.
- 陶洪祥, 何恢亚, 王全庆, 等. 1993. 扬子板块北缘构造演化史 [M]. 西安: 西北大学出版社. 1~ 141.
- 王根宝. 1995. 陕西省勉略宁地区碧口群基底构造碰撞带的发现及其意义 [J]. 陕西地质科技情报, 20(1): 13~ 26.
- 王振东, 霍向光, 王逢新. 1995. 秦岭岩群和碧口岩群层序时代的重新厘定 [J]. 中国区域地质, (3): 220~ 227.
- 魏春景. 1993. 陕甘川交界区碧口群的绿帘石及其岩石学意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 12(4): 332~ 340.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1996a. 南秦岭中-晚元古代火山岩性质与前寒武纪大陆裂解 [J]. 中国科学(D), 26(3): 237~ 243.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1996b. 南秦岭元古宙西乡群大陆溢流玄武岩的确定及其地质意义 [J]. 地质论评, 42(6): 513~ 522.
- 夏祖春, 夏林圻, 任有祥, 等. 1989. 南秦岭碧口群海相火山岩岩石学研究 [J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, (25): 97~ 107.
- 徐学义, 夏祖春, 夏林圻, 2001. 南秦岭元古宙板内火山作用特征及构造意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 20(3): 255~ 262.
- 闫全人, 王宗起, Hanson A D, 等. 2002. 南秦岭横丹群浊积岩系——晚古生代发育于扬子板块被动陆缘上的弧前盆地充填物 [J]. 地质通报, 21(8~ 9): 495~ 500.
- 杨宗让. 1997. 碧口地区中晚元古宙增生的弧前构造带及演化初析 [J]. 陕西地矿信息, 22(2): 13~ 19.
- 叶连俊, 关士聪. 1944. 甘肃中南部地质志 [J]. 地质专报, 甲种 19 号, 1~ 72.
- 张二朋, 牛道福, 霍有光, 等. 1993. 秦巴及邻区地质-构造特征概论 [M]. 北京: 地质出版社. 1~ 291.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社. 1~ 855.
- 张家润. 1990. 川西北地区碧口群之火山岩特征与构造环境 [J]. 四川地质学报, 10(4): 227~ 293.
- 赵祥生, 马少龙, 邹湘华, 等. 1990. 秦巴地区碧口群时代层序、火山作用及含矿性研究 [J]. 中国地质科学西安地质矿产研究所所刊, (29): 1~ 128.
- 左国朝. 1984. 西秦岭泥盆纪构造-建造及其地壳演化 [J]. 甘肃地质, (2): 99~ 110.