四川盐源地区晚二叠纪双峰式火山岩的厘定及其地质意义

程建康,孙宝伟,霍加庆,肖亮,王彬,朱凯宁
四川省地质矿产勘查开发局四〇五地质队,成都,611830

www.geojournals.cn/georev

内容提要:四川省盐源县柏林山一带广泛分布着一套基性岩、酸性岩的火山岩组合,两类火山岩在时空上紧密伴生,二者之间缺失中性火山岩,构成典型的双峰式火山岩组合。通过对区内双峰式火山岩的空间分布调查,基性岩主要为致密块状玄武岩、斑状玄武岩,酸性火山岩主要为碱流岩,碱流岩位于玄武岩顶部,为晚二叠纪峨眉山大火成岩省的组成部分。在地质背景、岩石学、地球化学等方面研究的基础上,对区内双峰式火山岩的成因和形成环境进行了探讨,表明玄武岩的原始岩浆来自富集型地幔源区,为地幔橄榄岩小程度部分熔融的产物,形成于洋岛构造环境,碱流岩主要为玄武岩浆极度分离结晶后的酸性残余岩浆形成,形成于陆内拉张构造环境。柏林山地区晚二叠纪双峰式火山岩的发现和厘定为峨眉山玄武岩的演化提供了新的线索和依据,为区域成矿研究以及稀有稀土找矿提供了新的启示。

关键词:双峰式火山岩;峨眉山玄武岩;碱流岩;地幔柱;盐源

在扬子地块西缘于晚二叠世形成的峨眉山大火成岩省(ELIP)是我国最早被国际学术界认可的大火山岩省(Chung Sunlin et al., 1995; Xu Yigang et al., 2001; 徐义刚等,2001;何斌等,2003;张招崇,2009),倍受国内外学者的广泛关注;而与峨眉山玄武岩紧密伴生的双峰式火山岩组合作为研究ELIP形成机理的重要依据,自20世纪80年代以来,大量学者(刘林等,1983;沈发奎等,1984;林建英,1987;张云湘等,1988;侯增谦等,1999;卢记仁,1999;邵辉等,2007;Xu Yigang et al., 2010; 朱靓等,2017;秦江锋等,2021)对ELIP内的岩石组合、岩石成因、形成环境及岩浆演化等开展了一系列的研究工作,取得了丰富的成果资料。研究表明ELIP主要由玄武质熔岩组成,在玄武岩顶部常伴有少量晚期形成的碱酸性火山岩,目前发现较为典型的碱酸性火山岩主要有分布于四川米易二滩、攀枝花务本等地的菱长斑岩或粗面岩组合,以及分布于云南大理、宾川等地的粗面安山岩和流纹岩,这些碱酸性火山岩与玄武岩构成经典的双峰式火山岩组合。虽然前人在ELIP内已发现了众多不同岩石组合的双峰式火山岩,但是出露规模较大、由碱性玄武岩、碱流岩构成的双峰式火山岩还鲜有报道,并且对区内双峰式火山岩的成因、构造环境也还存在不同的观点,以及双峰式火山岩与成矿方面的研究还较少。本文重点对四川盐源县柏林山一带新发现的双峰式火山岩组合开展地质背景、岩石学、地球化学方面的研究,并对其岩石成因、构造地质环境进行探讨,为研究ELIP的形成机制、构造演化及成矿研究提供新的线索和依据。

1 地质背景

研究区位于扬子陆块西缘盐源—丽江陆缘裂谷盆地的东南缘,北邻三江弧盆系和巴颜喀拉地块,南邻楚雄前陆盆地,东邻康滇基底断隆带(图1a)。箐河—程海断裂作为区域内重要的构造单元分界断裂,自晚古生代以来该断裂东西两侧表现为不同的大地构造演化环境,断裂以西区域,晋宁运动形成盐源—丽江台缘坳陷的褶皱基底后,开始大幅度沉降接受沉积,除古生代沉积有部分缺失外,在漫长的地史时期中,沉积了厚达20000 m的海相砂泥岩、碳酸盐岩等建造,其中三叠纪沉积物厚度将近占一半(刘家铎等,1995),反映该区域处于持续沉降的大

注:本文为四川省地质矿产勘查开发局四〇五地质队创新基金资助项目(编号:KJCX-2022-015)的成果。
收稿日期:2023-07-31;改回日期:2024-01-12;网络首发:2024-01-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.01.065
作者简介:程建康,男,1968年生,硕士,高级工程师,主要从事区域地质与矿产调查、地质矿产勘查与评价工作;Email: 530838781@qq.com。通讯作者:孙宝伟,男,1980年生,硕士,高级工程师,主要从事矿产勘查与评价工作;Email: 41066946@qq.com。

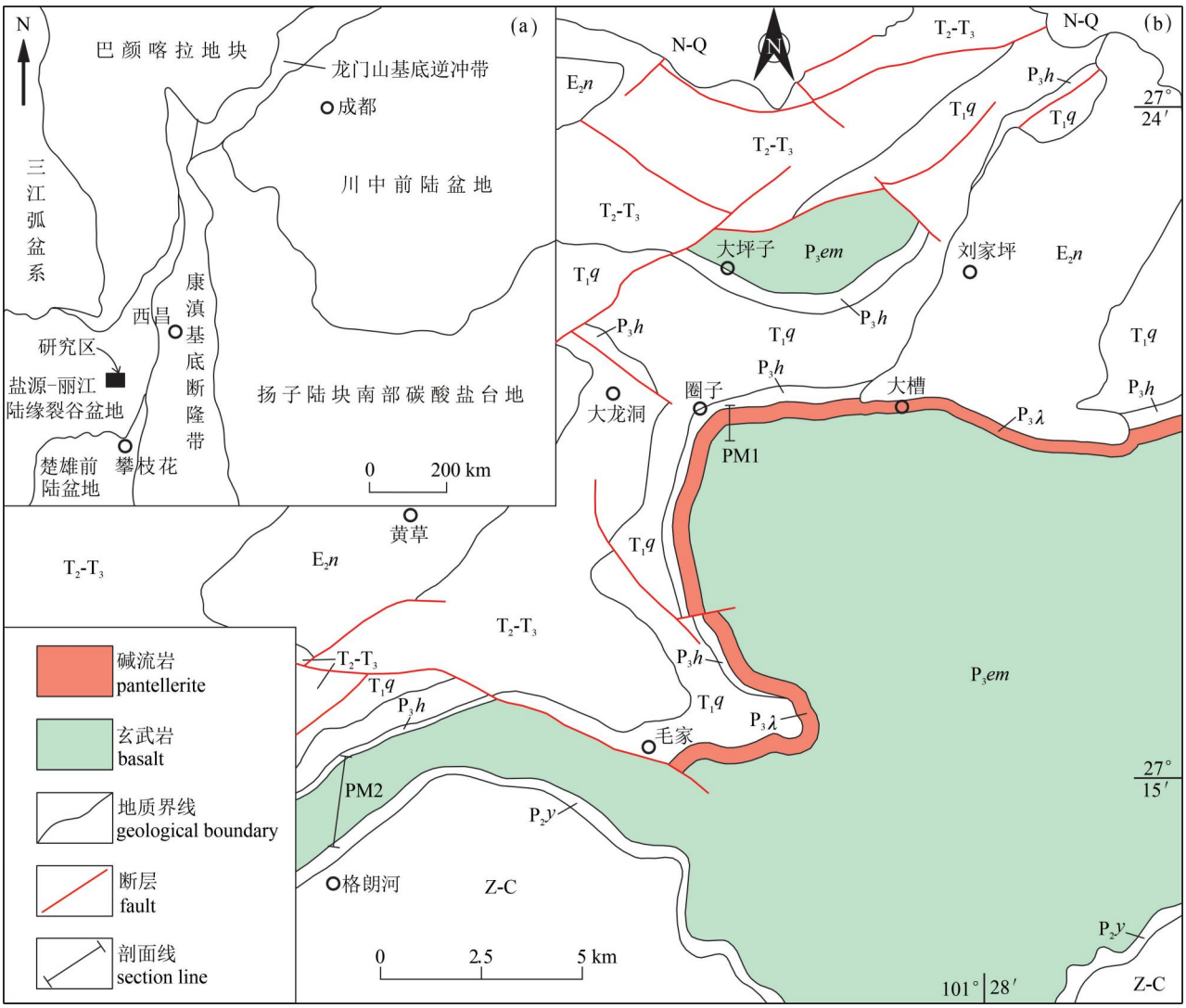

图 1 四川省盐源县柏林山地区构造位置(a;据潘桂棠等,2009 修改)及地质略图(b;据左群超等,2006 修改)

Fig. 1 Geotectonic location map (a; modified from Pan Guitang et al., 2010&) and geological sketch (b; modified from Zuo Qunchao et al., 2006&) of Mount Bailin area, Yanyuan County, Sichuan Province

Q—第四系;E_2n—始新统宁蒗组;T_2—T_3—中—上三叠统;T_1q—下三叠统青天堡组;P_3h—上二叠统黑泥哨组;$P_3\lambda$—上二叠统碱流岩;P_3em—上二叠统峨眉山玄武岩组;P_2y—中二叠统阳新组;Z—C—震旦系—石炭系

Q—Quaternary; E_2n—Eocene Ninglang Formation; T_2—T_3—Middle—Upper Triassic; T_1q—Lower Triassic Qingtianbao Formation; P_3h—Upper Permian Heinishao Formation; $P_3\lambda$—Upper Permian rhyolite; P_3em—Upper Permian Emeishan basalt; P_2y—Middle Permian Yangxin Formation; Z—C—Sinian—Carboniferous

地构造环境;断裂以东区域仅零星分布晚三叠世陆相地层,而大量缺失早—中三叠世海相地层,反映早三叠世开始该区域处于长期剥蚀环境,为盐源盆地沉积的主要物源区,证实康滇古陆形成于二叠纪晚期,与峨眉山地幔柱的活动有着直接关系。同时箐河—程海断裂也是峨眉山玄武岩岩区的重要分界线,控制着区内玄武岩的分布,断裂以西为陆缘海相喷发的碱性玄武岩,断裂以东为双峰式火山岩套分布区,早期主要为大陆裂谷型碱性到拉斑玄武岩,晚期有少量喷发形成的菱长斑岩、熔结凝灰岩等碱酸性火山岩(张云湘等,1988)。根据地幔柱活动分带,研究区位于内带北西部,为峨眉山地幔柱头熔融区域,岩性较为复杂,主要表现为下部为低钛玄武岩,上部为高钛玄武岩和中酸性岩(Xu Yigang et al., 2004; He Bin et al., 2007)。

研究区及邻近区域主要构造线与盐源推覆构造

的前锋断裂(箐河—程海断裂)走向基本一致,呈北东—南西向,主要发育上二叠统、三叠系、古近系、新近系及第四系。黑泥哨组、青天堡组、盐塘组、白山组、宁蒗组等地层均遭受不同程度的构造挤压变形,反映出盐源推覆构造活动的多期性和长期性,即始于印支期,而成于喜马拉雅期(葛肖虹,1984)。区内出露的火山岩主要为晚二叠世形成的峨眉山溢流玄武岩(P_3em),其次在峨眉山玄武岩顶部普遍分布有岩浆喷溢晚期形成的碱流岩($P_3\lambda$),玄武岩与碱流岩在时空上存在密切的关系,构成了典型的双峰式火山岩套。盐源县柏林山一带玄武岩呈北东—南西向弧形带状分布,与箐河—程海断裂近于平行,与下伏阳新组地层为平行不整合接触,最大厚度达 3230 m(张云湘等,1988);碱流岩分布于玄武岩的顶部,与下伏玄武岩为整合接触,与上覆黑泥哨组地层为平行不整合接触,最大厚度达 400 m 以上(图 1b)。

2　样品采集与测试方法

根据研究区内酸性火山岩和基性火山岩的分布和出露情况,本次开展了实测地质剖面(PM1)和路线调查剖面(PM2)工作,具体剖面位置见图 1b;本次研究采集的样品均位于剖面之上,共采集有代表性的火山岩岩石样品 18 件,其中 PM1 剖面采集基性火山岩(玄武岩)样品 2 件,酸性火山岩样品 12 件(流纹岩 3 件、碱流岩 9 件),具体采样位置见图 2a,PM2 剖面采集基性火山岩(玄武岩)样品 4 件,具体采样位置见图 2b。

样品测试由四川西冶检测科技有限公司完成,检测方法包括质谱法、等离子发射光谱法、重量法、滴定法等;检测标准依据《岩石矿物分析》、GB/T 6730.62-2005、DZG20-06-2004、GB/T 14506.28-2010、GB/T 14506.14-2010、GB/T 14506.2-2010、GB/T 3286.8-2014、DZ/T 0279.1-2016。主元素主要采用波长色散 X 射线荧光光谱仪(XRF)(仪器型号:荷兰帕纳科 PW4400/40)分析,氧化亚铁量采用滴定分析测定,分析指标为 SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、FeO、CaO、MgO、K_2O、Na_2O、P_2O_5、MnO、TiO_2 及烧失量;微量元素和稀土元素采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)(仪器型号:美国珀金埃尔默 NexIon 300x)、波长色散 X 射线荧光光谱仪(XRF)(仪器型号:荷兰帕纳科 PW4400/40)分析,微量元素分析指标为 Rb、Ba、Th、U、Nb、Ta、Sr、Zr、Hf、Sc、Bi、Cs、Cr、

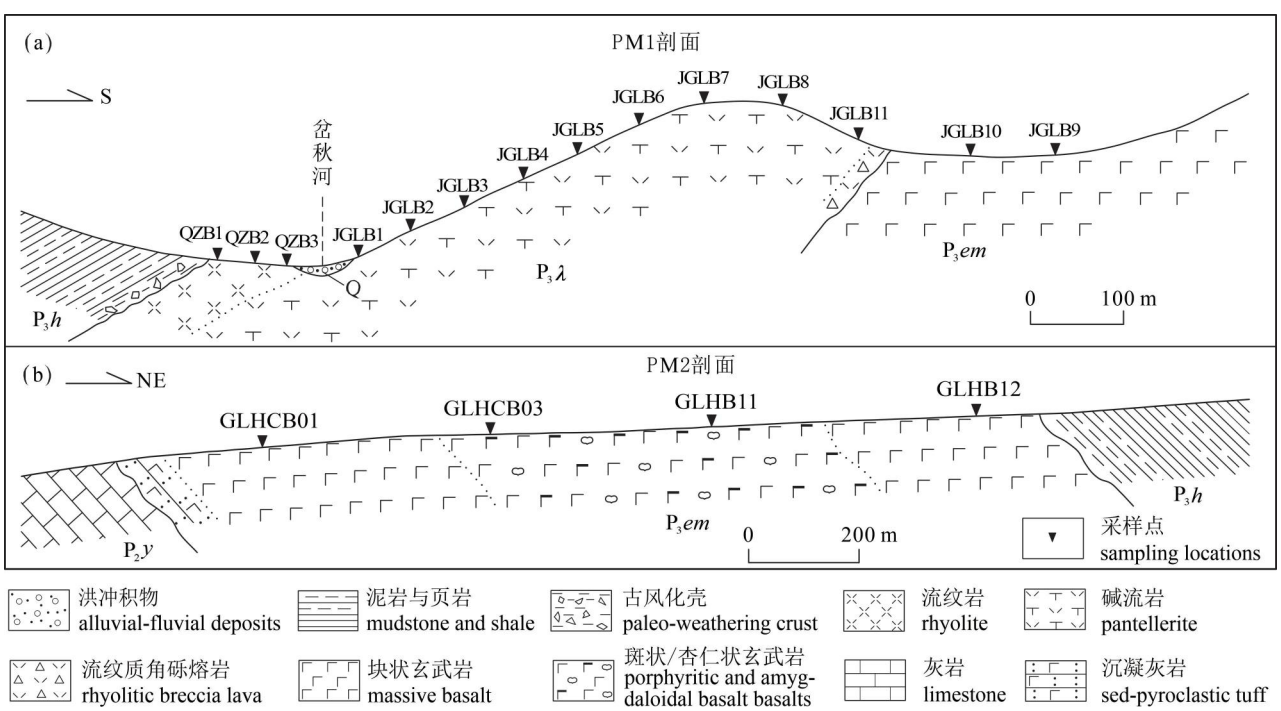

图 2 盐源柏林山地区峨眉山玄武岩组火山岩剖面简图

Fig. 2 Profile sketch of the volcanic rocks of the Emeishan Basalt Formation in Mount Bailin area, Yanyuan

Q—第四系;P_3h—上二叠统黑泥哨组;$P_3\lambda$—上二叠统碱流岩;P_3em—上二叠统峨眉山玄武岩组;P_2y—中二叠统阳新组

Q—Quaternary; P_3h— Upper Permian Heinisho Formation; $P_3\lambda$—Upper Permian rhyolite; P_3em—Upper Permian Emeishan basalt; P_2y— Middle Permian YangXin Formation

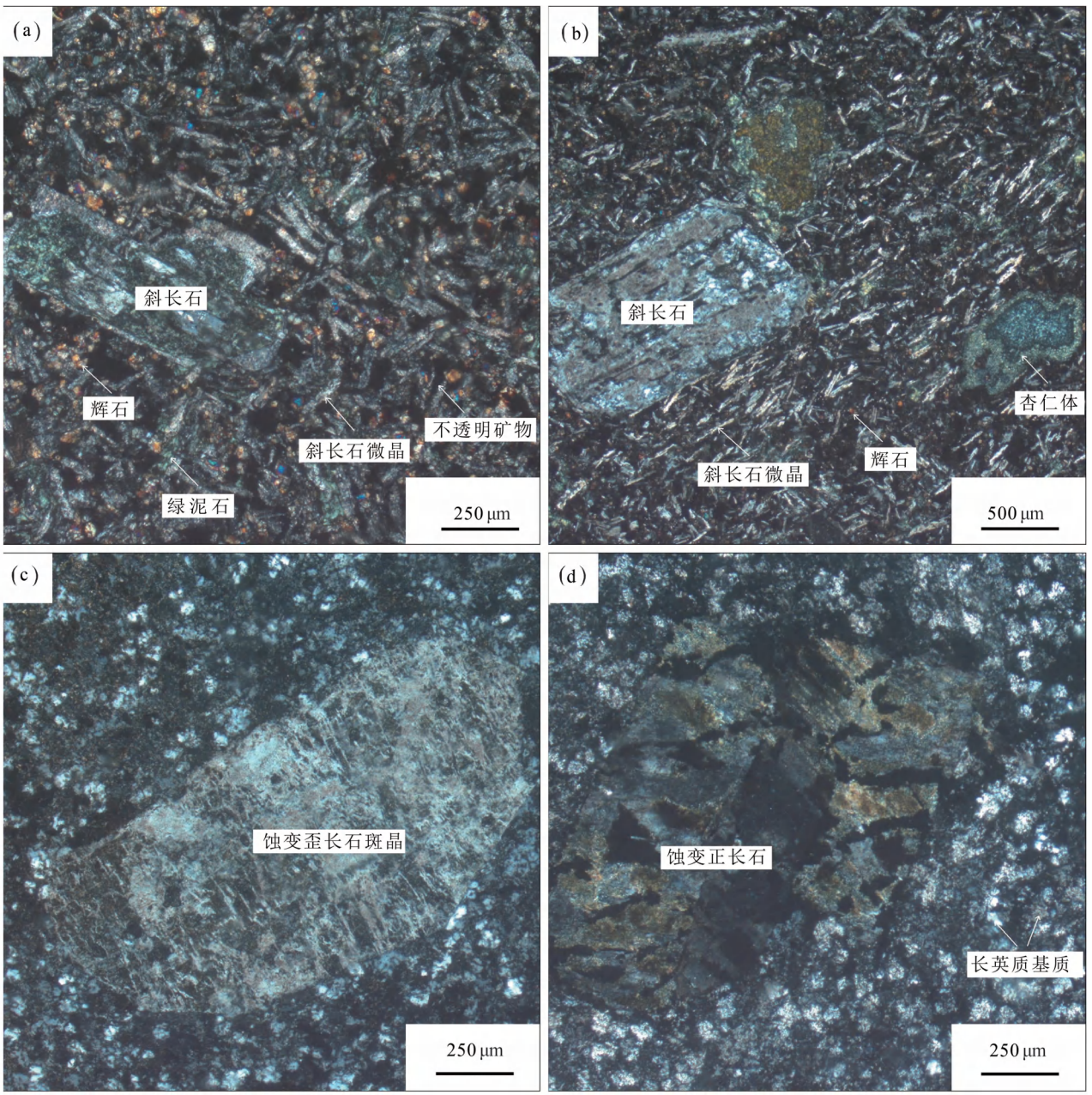

图 3 盐源柏林山地区上二叠统峨眉山组火山岩显微照片(正交偏光):(a) 致密块状玄武岩;(b) 斑状玄武岩;(c) 碱流岩;(d) 流纹岩

Fig. 3 Microscopic photos of the volcanic rocks of the Upper Permian Emeishan Formation in Mount Bailin area, Yanyuna(cross polarized light): (a) dense massive basalt; (b) porphyritic basalt; (c) pantellerite; (d) rhyolite

Ni、Co、V、W、Ga,稀土元素为 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y。主元素组分含量>1%的测定结果分析误差 1%~5%,平均优于 5%,微量元素和稀土元素测定结果分析误差一般为 3%~5%,平均优于 5%,部分含量极低元素测定结果分析误差 5%~15%。各项分析结果列于表 1。

3 火山岩分布及岩石学特征

3.1 基性火山岩

研究区内基性火山岩(玄武岩)位于柏林山主峰的南西侧,呈北东—南西向展布,两端延伸出研究区,区内出露面积约 190 km^2,厚度一般介于 950~2400 m,平均厚度大于 2000 m。岩石主要由基性火山熔岩和火山碎屑岩组成,自底部而上总体变化特征表现为火山(沉)凝灰岩—致密块状玄武岩—斑状、杏仁状玄武岩—致密块状玄武岩,其中以致密块

表 1 盐源柏林山地区火山岩主量元素(%)、微量元素及稀土元素($\times10^{-6}$)分析结果

Table 1 Analysis results of major elements(%), trace elements and rare earth elements($\times10^{-6}$) from volcanic rocks in Mount Bailin area, Yanyuna

样品	酸性火山岩(碱流岩、流纹岩)												基性火山岩(玄武岩)					
	QZB1	QZB2	QZB3	JGLB1	JGLB2	JGLB3	JGLB4	JGLB5	JGLB6	JGLB7	JGLB8	JGLB11	JGLB9	JGLB10	GLHB11	GLHB12	GLHCB01	GLHCB03
SiO_2	72.04	64.34	72.17	71.44	71.67	72.02	76.82	73.09	71.28	69.74	72.84	70.95	46.45	45.84	48.23	46.36	42.51	48.24
Al_2O_3	9.94	12.44	8.88	10.15	10.14	9.64	8.51	9.50	9.38	9.95	9.80	9.64	13.69	14.09	13.53	13.24	9.75	16.90
Fe_2O_3	4.72	10.98	5.36	4.99	5.74	5.42	4.39	7.54	6.57	8.42	5.50	4.24	8.59	5.92	5.33	6.17	5.67	9.52
FeO	2.15	0.10	0.89	2.54	1.65	2.01	0.77	0.61	0.87	0.25	1.04	0.52	5.64	7.45	8.46	8.40	7.28	4.09
MgO	0.20	0.08	0.18	0.19	0.10	0.12	0.39	0.27	0.29	0.32	0.20	1.06	5.26	6.89	4.72	4.60	9.76	2.28
CaO	0.18	0.21	0.43	0.75	0.72	0.71	0.68	0.49	0.82	0.59	0.98	1.56	8.67	9.71	9.45	9.05	10.66	5.27
Na_2O	2.23	5.17	1.69	2.91	3.05	2.92	0.43	2.84	2.86	2.31	2.94	0.75	4.36	3.31	2.42	2.39	0.89	4.43
K_2O	1.12	0.57	4.28	4.47	4.02	4.60	5.52	3.80	4.15	4.02	4.38	6.79	0.13	0.55	1.73	0.93	0.06	1.14
TiO_2	0.57	0.60	0.50	0.60	0.57	0.57	0.46	0.51	0.52	0.54	0.53	0.54	1.96	1.92	3.32	4.50	2.60	3.39
MnO	0.21	0.28	0.14	0.33	0.26	0.27	0.09	0.02	0.30	0.58	0.21	0.38	0.17	0.23	0.18	0.19	0.35	0.16
P_2O_5	0.02	0.04	0.02	0.04	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.22	0.21	0.48	0.52	0.26	0.40
烧失	—	—	—	1.62	1.63	1.38	1.94	1.09	2.33	3.59	1.65	3.56	3.79	3.56	1.67	2.77	10.12	3.24
总和	—	—	—	100.01	99.59	99.68	100.01	99.79	99.40	100.31	100.09	100.01	98.93	99.66	99.52	99.10	99.91	99.07
σ	0.39	1.54	1.22	1.91	1.74	1.95	1.05	1.47	1.74	1.50	1.79	2.03	5.84	5.23	3.29	3.26	—	5.93
AR	2.58	9.95	2.14	3.28	3.56	3.59	1.21	3.64	3.55	2.56	3.39	1.31	1.50	1.39	1.44	1.35	1.10	1.67
FeO^T	6.40	9.98	5.71	7.03	6.81	6.88	4.71	7.40	6.78	7.82	5.99	4.34	13.37	12.78	13.25	13.95	12.38	12.66
$Mg^{\#}$	0.05	0.01	0.05	0.05	0.03	0.03	0.13	0.06	0.07	0.07	0.06	0.30	0.41	0.49	0.39	0.37	0.58	0.24
A/CNK	1.91	1.31	1.08	0.92	0.95	0.87	1.07	0.98	0.88	1.08	0.86	0.84	0.59	0.59	0.59	0.62	0.47	0.93
La	172	190	174	133	137	106	50.6	93.6	123	42.0	244	141	21.1	14.3	45.7	45.4	20.2	51.0
Ce	386	469	360	359	325	297	77.2	97.9	262	195	356	288	44.9	30.1	98.3	109	54.5	138
Pr	40.3	46.9	43.2	45.1	42.9	39.9	13.8	21.1	38.9	10.7	57.1	35.2	5.70	4.49	11.41	14.27	7.70	17.15
Nd	162	166	160	195	184	172	54.9	82.7	160	40.2	236	142	24.7	19.2	47.2	60.9	38.0	77.1
Sm	29.1	32.9	29.1	35.8	31.5	31.9	11.9	14.5	26.2	8.99	37.0	24.4	4.87	3.87	7.36	11.4	7.30	12.6
Eu	5.49	5.78	5.30	4.91	4.45	3.86	2.73	2.73	4.31	1.79	6.82	4.15	1.52	1.50	2.40	3.74	1.83	3.34
Gd	27.0	31.8	28.1	30.0	27.2	27.0	15.1	13.6	25.0	10.0	35.4	21.2	5.35	4.28	6.81	10.6	5.91	9.24
Tb	4.00	5.65	4.02	4.57	4.13	4.05	3.23	2.45	4.33	2.32	5.87	3.88	0.944	0.754	1.10	1.66	0.826	1.31
Dy	22.0	37.1	25.4	23.6	22.6	21.8	15.4	13.0	20.7	14.3	27.9	21.0	4.70	4.06	5.29	7.63	3.99	6.25
Ho	4.10	7.94	4.96	4.44	4.18	4.10	3.64	2.81	4.36	3.30	5.44	4.39	1.05	0.837	1.06	1.63	0.665	1.07
Er	10.5	24.6	14.3	11.7	11.4	11.3	2.73	2.73	4.31	1.79	6.82	4.15	1.52	1.50	2.40	3.74	1.77	2.85
Tm	1.26	3.56	1.85	1.57	1.51	1.47	1.55	1.18	1.65	1.46	1.83	1.90	0.419	0.344	0.385	0.522	0.205	0.342
Yb	10.1	29.2	14.3	10.9	10.2	9.8	9.16	7.90	11.20	9.97	12.8	12.2	2.44	1.95	2.42	3.33	1.34	2.19
Lu	1.00	3.08	1.42	1.17	1.12	1.09	1.44	1.01	1.35	1.20	1.50	1.47	0.328	0.302	0.311	0.389	0.148	0.230
Y	100	211	146	102	100	94.6	66.0	47.7	86.0	69.9	104	92.3	21.7	17.7	22.8	33.4	19.5	25.4
LREE	795	910	772	772	724	650	211	312	614	299	936	635	103	73.5	212	245	130	299

样品	酸性火山岩(碱流岩、流纹岩)												基性火山岩(玄武岩)					
	QZB1	QZB2	QZB3	JGLB1	JGLB2	JGLB3	JGLB4	JGLB5	JGLB6	JGLB7	JGLB8	JGLB11	JGLB9	JGLB10	GLHB11	GLHB12	GLHCB01	GLHCB03
HREE	180	354	240	190	182	175	118	92.4	159	114	202	162	38.4	31.7	42.6	62.9	34.3	48.9
∑REE	975	1264	1012	962	907	826	329	405	773	413	1138	797	141	105	255	308	164	348
∑Ce/∑Y	4.41	2.57	3.21	4.07	3.97	3.71	1.79	3.38	3.86	2.62	4.65	3.91	2.68	2.32	4.98	3.89	3.78	6.12
δEu	0.589	0.539	0.559	0.446	0.453	0.392	0.624	0.586	0.508	0.574	0.568	0.546	0.907	1.12	1.02	1.02	0.823	0.903
δCe	1.14	1.22	1.02	1.14	1.04	1.12	0.717	0.540	0.931	2.26	0.739	1.00	1.00	0.920	1.05	1.05	1.07	1.15
$(La/Yb)_N$	12.27	4.67	8.72	8.76	9.68	7.75	3.96	8.50	7.86	3.02	13.64	8.25	6.19	5.27	13.55	9.77	10.83	16.71
$(La/Sm)_N$	3.82	3.72	3.85	2.40	2.80	2.15	2.74	4.17	3.02	3.02	4.26	3.73	2.79	2.39	4.01	2.56	1.79	2.61
$(Gd/Yb)_N$	2.22	0.903	1.63	2.29	2.22	2.27	1.36	1.42	1.85	0.827	2.28	1.43	1.81	1.82	2.33	2.64	3.66	3.49
Rb	43.6	8.71	128	190	170	194	125	107	128	123	144	223	4.93	25.1	27.2	19.4	3.92	19.0
Ba	146	84.7	308	172	134	171	770	176	144	181	213	474	35.0	449	534	422	89.6	384
Th	22.9	18.6	24.2	32.3	31.5	32.7	17.3	17.9	23.7	24.9	24.1	20.9	1.95	1.98	7.44	5.30	2.80	6.04
U	3.71	3.41	6.64	6.42	6.21	6.22	3.62	2.74	4.65	5.41	4.29	3.96	0.418	0.382	1.97	1.28	1.30	1.20
Nb	179	211	160	242	243	226	173	175	184	176	185	172	19.23	15.60	51.3	43.5	23.4	44.8
Ta	15.4	17.8	12.5	13.3	13.2	12.0	13.3	13.2	18.6	16.4	18.0	12.5	2.33	1.50	3.87	4.13	1.37	3.09
Sr	41.0	26.3	87.2	78.6	83.8	60.6	20.3	38.3	111	46.1	102	37.2	373	786	464	552	198	865
Zr	1717	1875	1570	1673	1700	1621	1439	1561	1663	1579	1582	1660	129	114	327	399	201	333
Hf	48.0	50.7	43.9	45.5	46.5	44.1	39.7	42.2	45.3	42.9	43.7	46.4	3.31	2.98	8.18	9.72	4.90	8.59
Sc	2.08	1.53	2.12	1.74	1.27	1.69	1.26	1.03	1.21	1.70	1.43	1.61	37.1	44.0	19.0	28.6	39.2	21.2
Bi	0.083	0.123	0.173	0.097	0.101	0.105	0.461	0.125	0.145	0.102	0.089	0.108	0.145	0.088	0.056	0.095	0.153	0.108
Cs	0.525	0.430	0.880	1.88	2.03	1.66	3.05	0.582	1.50	0.547	0.971	1.94	0.482	0.703	0.310	0.483	4.00	0.714
Cr	4.28	5.01	1.31	6.49	4.85	4.74	4.58	4.06	2.31	3.61	3.21	3.94	155	111	88.0	84.3	701	75.2
Ni	2.46	2.61	0.590	2.21	1.04	2.48	0.874	0.574	0.802	3.11	0.591	2.05	93.4	79.6	76.9	85.9	376	45.7
Co	1.45	2.06	0.688	1.97	0.944	1.14	1.07	0.707	0.641	3.24	1.03	2.57	63.0	56.9	51.2	51.2	83.5	38.0
V	7.13	2.92	3.06	7.37	3.09	4.84	1.83	1.00	1.16	3.18	1.38	6.09	485	436	415	578	326	210
W	0.303	1.99	1.02	0.734	0.954	0.830	1.45	1.95	0.616	1.01	1.19	0.946	1.31	1.15	0.350	0.612	0.382	0.747
Ga	—	—	—	—	—	—	25.2	24.6	18.9	25.3	23.4	32.8	17.5	18.5	22.6	25.8	—	—
Zr/Hf	35.77	36.99	35.75	36.79	36.52	36.79	36.21	36.96	36.69	36.79	36.24	35.75	38.92	38.32	39.93	41.09	40.94	38.75
Th/Ta	1.49	1.05	1.93	2.43	2.40	2.72	1.30	1.36	1.27	1.51	1.34	1.68	0.84	1.32	1.92	1.29	2.05	1.96
Th/Nb	0.128	0.088	0.151	0.133	0.130	0.145	0.100	0.102	0.129	0.142	0.130	0.121	0.102	0.127	0.145	0.122	0.120	0.135
Nb/Ta	11.65	11.89	12.81	18.21	18.48	18.82	12.99	13.30	9.88	10.70	10.29	13.80	8.25	10.41	13.24	10.54	17.15	14.50
Ti/Y	34.00	17.01	20.54	35.20	34.07	36.40	41.55	64.45	36.53	46.35	30.53	34.80	541.48	649.49	872.08	807.95	802.68	799.95
Rb/Sr	1.06	0.331	1.46	2.41	2.03	3.20	6.17	2.81	1.16	2.67	1.42	5.99	0.013	0.032	0.059	0.035	0.020	0.022
Nb/Th	7.81	11.37	6.63	7.50	7.71	6.91	9.98	9.79	7.75	7.06	7.68	8.23	9.85	7.86	6.89	8.20	8.37	7.41

注：$Mg^{\#}=(MgO/40.3044)/(MgO/40.3044+FeO^T/71.844)$；$FeO^T=FeO+0.8998*Fe_2O_3$(见邓晋福等,2015)；稀土参数计算采用 Sun & McDonough(1989)球粒陨石标准化值。

状、斑状溢流玄武岩为主体,在玄武岩之间常夹有多个喷发间断而形成的凝灰质泥页岩夹层(图 1b、图 2)。

致密块状玄武岩:灰绿—深灰色,具有间粒或间隐结构,块状构造,由斑晶、基质两部分组成,偶见气孔。斑晶为斜长石,板状,自形—半自形,粒度多在 0.13~0.15 mm,约占 2%。基质呈充填状分布在斑晶矿物之间,约占 98%,主要为斜长石微晶,长板状,粒度 0.1~0.5 mm,约 44%,辉石,粒状、柱状,粒度 0.15 mm 以下不等,约 35%;绿泥石,鳞片集合体状,粒度 0.2 mm 以下,约 12%;混杂少量不透明矿物,主要为铁质等,粒状,约 7%(图 3a)。

斑状玄武岩:灰绿—深灰色,斑状结构,气孔、杏仁构造,由斑晶、基质及杏仁体组成。斑晶为斜长石,板状,半自形—自形,粒度多在 0.6~3.8 mm 之间不等,约占 10%,具熔蚀麻点现象,双晶特征发育。基质呈充填状分布在斑晶矿物之间,具间粒或间隐结构,约占 80%,主要为斜长石微晶,板状,粒度多在 0.05~0.25 mm 之间,约占 35%,辉石,粒状,粒度多在 0.07 mm 以下,约近 34%,绿泥石约占 10%,并见少量不透明矿物,主要为铁质等,约占 8%。杏仁体,近 10%,呈圆或椭圆状、不规则状,内部填充绿纤石、绿鳞石及长石等(图 3b)。

3.2　酸性火山岩

研究区内酸性火山岩位于基性火山岩顶部,与下伏峨嵋山玄武岩为整合接触,与上覆黑泥哨组为平行不整合接触。酸性火山岩总体上呈弧形带状连续分布,西端被断层错断,东端延伸出研究区,在毛家—圈子—大槽一带均有良好的露头,区内出露面积约 10 km^2,厚度一般介于 100~400 m,平均厚度大于 200 m,其中 PM1 实测剖面处厚度约 416 m。岩石主要为碱流岩,其次在碱流岩上部零星分布有少量流纹岩,自底部而上表现为流纹质火山集块岩、火山角砾熔岩—灰色、深灰色碱流岩—紫红色、灰绿色流纹岩—褐红色流纹岩、碱流岩古风化层的总体变化特征(图 1b、图 2a)。

碱流岩:浅灰—深灰色,斑状结构,块状构造,由斑晶、基质两部分组成。斑晶主要为歪长石,板状,粒度多在 1~2.5 mm,发育卡尔斯巴双晶,约占 15%,部分因强蚀变,双晶特征被掩盖,只保留其板状颗粒外形存在。基质呈充填状分布在斑晶矿物之间,具嵌晶结构,约占 85%,主要为长英质,由长石、石英两者镶嵌状组成,粒度多在 0.15 mm 以下,约占 58%,霓石—钠铁闪石为典型碱性矿物,两者相混杂,粒状、柱状,粒度多在 0.25 mm 以下不等,约占 10%,云母为黑云母,约占 12%、隐晶质约占 2%,不透明矿物主要为铁质,约占 3%(图 3c)。

流纹岩:紫红色、灰绿色,斑状结构、隐晶质结构,杏仁状、流纹状、气孔状构造,常由斑晶、基质、杏仁组成。斑晶主要为正长石,粒度多在 0.7~1.7 mm,可见卡尔斯巴双晶,约占 15%。基质主要为细小长英质,呈隐晶粒状、隐晶集合体状、球粒状,长石、石英镶嵌形成嵌晶结构,粒度多在 0.1 mm 以下,约占 70%,混杂少量不透明矿物,约占 10%。气孔中常充填有后期重结晶的长英质、硅质,形成杏仁体,约占 5%(图 3d)。

4　岩石地球化学特征

4.1　主量元素

由表 1 可知,基性火山岩和酸性火山岩 SiO_2 含量(质量分数,下同)分别介于 42.51%~48.24%和 64.34%~76.82%之间,SiO_2 含量在 48.82%~64.34%之间有明显的 Daly 成分间断(Daly, 1925),表现出典型的双峰式火山岩组合特征。

基性火山岩 SiO_2 平均为 46.27%,Na_2O 含量介于 0.89%~4.43%,平均为 2.97%,K_2O 含量介于 0.06%~1.73%,平均为 0.76%,全碱(Na_2O+K_2O)含量介于 0.95%~5.57%,平均为 3.72%,Na_2O/K_2O 介于 1.40%~33.54%,平均为 10.37%,总体上具有富钠贫钾特征(图 4d);里特曼指数(σ)介于 3.26~5.93,平均为 4.71,属碱性岩系列;铝饱和系数(A/CNK)介于 0.47%~0.93%,平均为为 0.63%,为偏铝质岩;TiO_2 含量介于 1.92%~4.50%,平均为 2.95%,且 Ti/Y 介于 541.5~872.1,为高钛玄武岩(Ti/Y>500)(Xu Yigang et al., 2001)。在 TAS 图解上样品投影点主要落于玄武岩区间(图 4a),在 SiO_2—Nb/Y 和 SiO_2—AR 图解上样品投影点分别落于碱性玄武岩和碱性岩区间(图 4b、4c),表明研究区内玄武岩主要为碱性高钛玄武岩系列。

酸性火山岩 SiO_2 平均为 71.53%,Na_2O 含量介于 0.43%~5.17%,平均为 2.51%,K_2O 含量介于 0.57%~6.79%,平均为 3.98%,全碱(Na_2O+K_2O)含量介于 3.35%~7.54%,平均为 6.49%,Na_2O/K_2O 介于 0.08%~9.07%,平均为 1.36%,变化较大,总体上具有富钾贫钠特征(图 4d);由于 SiO_2 含量大于 70%,且酸性岩普遍遭受不同程度的蚀变,采用里特曼指数(σ)进行岩石碱性判断存在较大的误差,因此采用 SiO_2—AR(碱度率)图解判别酸性

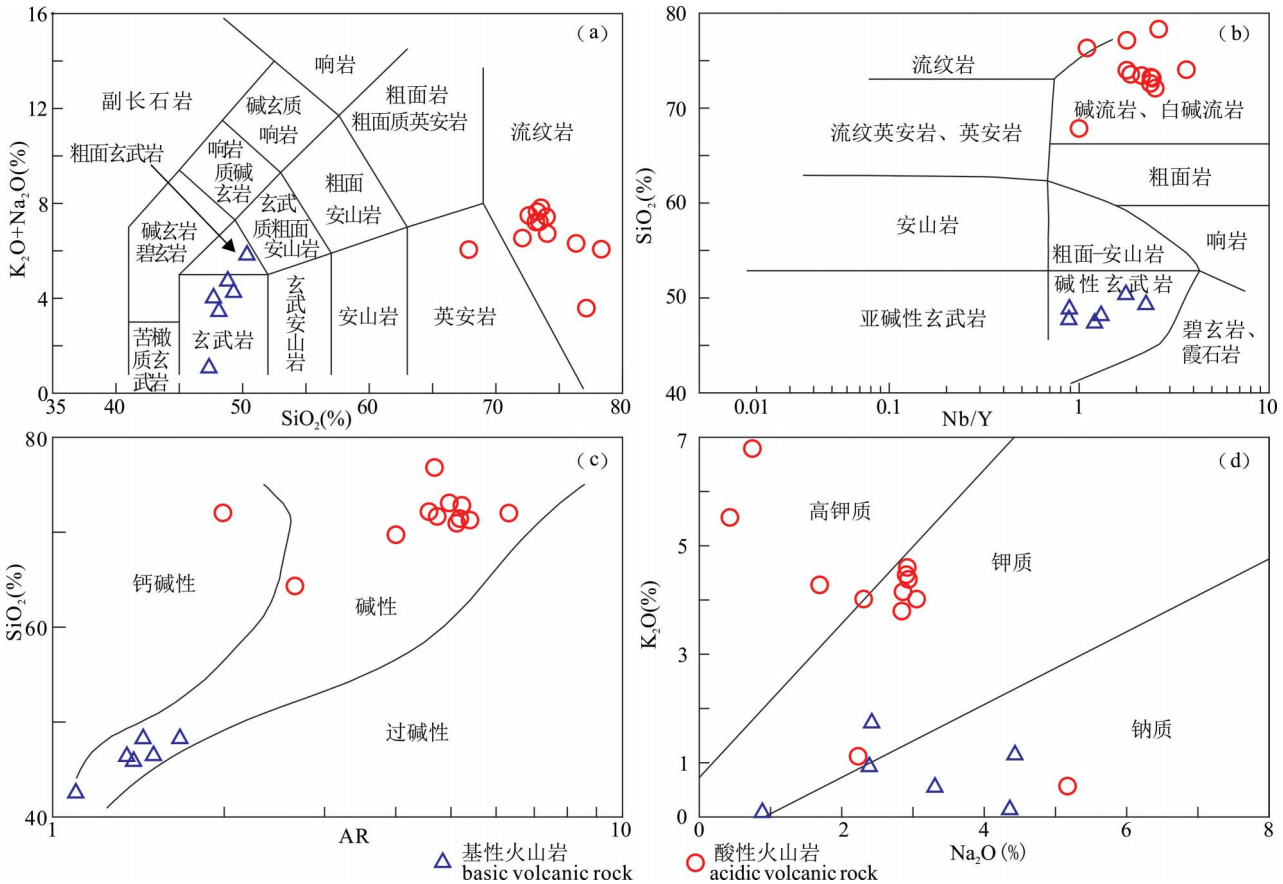

图 4 盐源柏林山地区火山岩 TAS 图解(a:据 Le Bas et al., 1986)、SiO_2—Nb/Y 图解(b:据 Winchester et al., 1977)、SiO_2—*AR* 图解(c:据 Wrigh, 1969)及 K_2O—Na_2O 图解(d:据 Middlemosmt, 1972)

Fig. 4 TAS (a, after Le Bas et al., 1986), Nb/Y—SiO_2(b, after Winchester et al., 1977), SiO_2—AR (c, after Wrigh, 1969) and K_2O—Na_2O (d, after Middlemosmt, 1972) diagrams of volcanic rocks in Mount Bailin area, Yanyuna

岩为碱性岩石(图 4c);铝饱和系数(A/CNK)介于 0.84%~1.91%,平均为为 1.06%,为过铝质岩;酸性岩中 CaO、MgO、P_2O_5、TiO_2 含量与玄武岩相比具显著的降低(图 5b、图 5d—5f),Al_2O_3、TFe_2O_3 含量具明显的降低(图 5a、图 5c)。在 TAS 图解上样品投影点主要落于流纹岩区间(图 4a),在 SiO_2—Nb/Y 图解上样品投影点绝大部分落于碱流岩区间,少数落于流纹岩区间(图 4b),表明研究区内酸性岩主要为碱流岩系列,其次存在少量的流纹岩系列,与野外调查和显微镜下鉴定结果一致。

4.2 稀土元素

由表 1 可知,研究区内基性火山岩(玄武岩)的 LREE 含量介于 73.5×10^{-6}~299×10^{-6},平均为 177×10^{-6},HREE 的含量介于 31.7×10^{-6}~62.9×10^{-6},平均为 43.1×10^{-6},∑REE 含量介于 105×10^{-6}~348×10^{-6},平均为 220×10^{-6},∑Ce/∑Y 值介于 2.32~6.12 之间,平均 3.96;$(La/Yb)_N$ 介于 5.27~16.71,平均为 10.39,$(La/Sm)_N$ 介于 1.79~4.01,平均为 2.69,$(Gd/Yb)_N$ 介于 1.81~3.66,平均为 2.63;稀土元素球粒陨石标准化配分图显示,玄武岩样品稀土元素分曲线基本平行一致且向右陡倾(图 6a),表明玄武岩为轻稀土强烈富集而重稀土亏损,为轻稀土富集型;而 $(La/Sm)_N$ 与 $(Gd/Yb)_N$ 相近,表明轻重稀土元素内部均不存在明显的分馏过程(Davids et al., 1987)。基性火山岩的 δEu 值介于 0.823~1.12,平均 0.966,δCe 值介于 0.920~1.15,平均 1.04,表明 Eu、Ce 异常均不明显。

研究区内酸性火山岩(碱流岩、流纹岩)的 LREE 含量介于 211×10^{-6}~936×10^{-6},平均为 636×10^{-6},HREE 的含量含量介于 92.4×10^{-6}~354×10^{-6},平均为 181×10^{-6},∑REE 含量介于 329×10^{-6}~1264×10^{-6},平均为 817×10^{-6},∑Ce/∑Y 值介于 1.79~

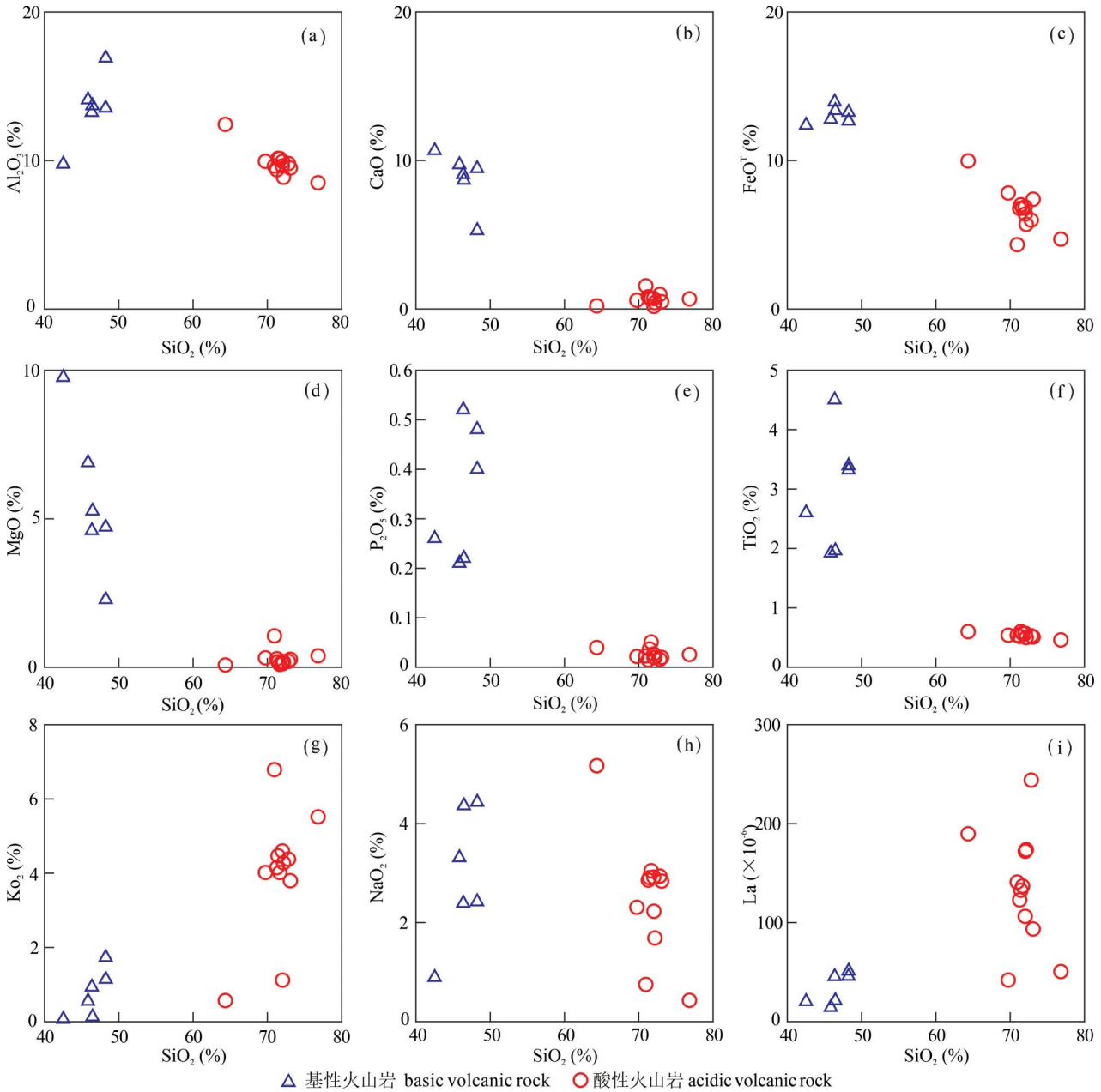

图 5 盐源柏林山地区火山岩 Harker 图解

Fig. 5 Harker diagram of the volcanic rocks in Mount Bailin area, Yanyuna

4.65 之间,平均 3.51,稀土元素含量明显高于研究区内基性火山岩稀土元素含量;$(La/Yb)_N$ 介于 3.02~13.64,平均为 8.09,$(La/Sm)_N$ 介于 2.15~4.26,平均为 3.31,$(Gd/Yb)_N$ 介于 0.827~2.29,平均为 1.68;稀土元素球粒陨石标准化配分图显示,酸性火山样品稀土元素分曲线基本平行一致而右倾,且轻稀土段曲线陡倾而重稀土曲平缓(图 6c),表明酸性火山岩为轻稀土强烈富集而重稀土亏损,为轻稀土富集型;而 $(La/Sm)_N>(Gd/Yb)_N>1$,表明轻稀土元素内部分馏程度明显高于重稀土元素。酸性火山岩的 δEu 值介于 0.392~0.624,平均 0.532,表现为明显的负 Eu 异常,反映出岩浆结晶分异过程中,斜长石、钾长石、歪长石的大量晶出;δCe 值介于 0.540~2.26,平均 1.07,表现为微弱的 Ce 异常,与酸性火山岩后期遭受风化蚀变作用有关(王中刚等,1989)。此外,部分样品中出现明显的 Er 亏损,根据野外调查,这些样品位于基性火山岩较近位置,可能因酸性岩浆与基性岩同化混染有关。

4.3　微量元素特征

由表 1 及原始地幔标准化微量元素蜘蛛图(图

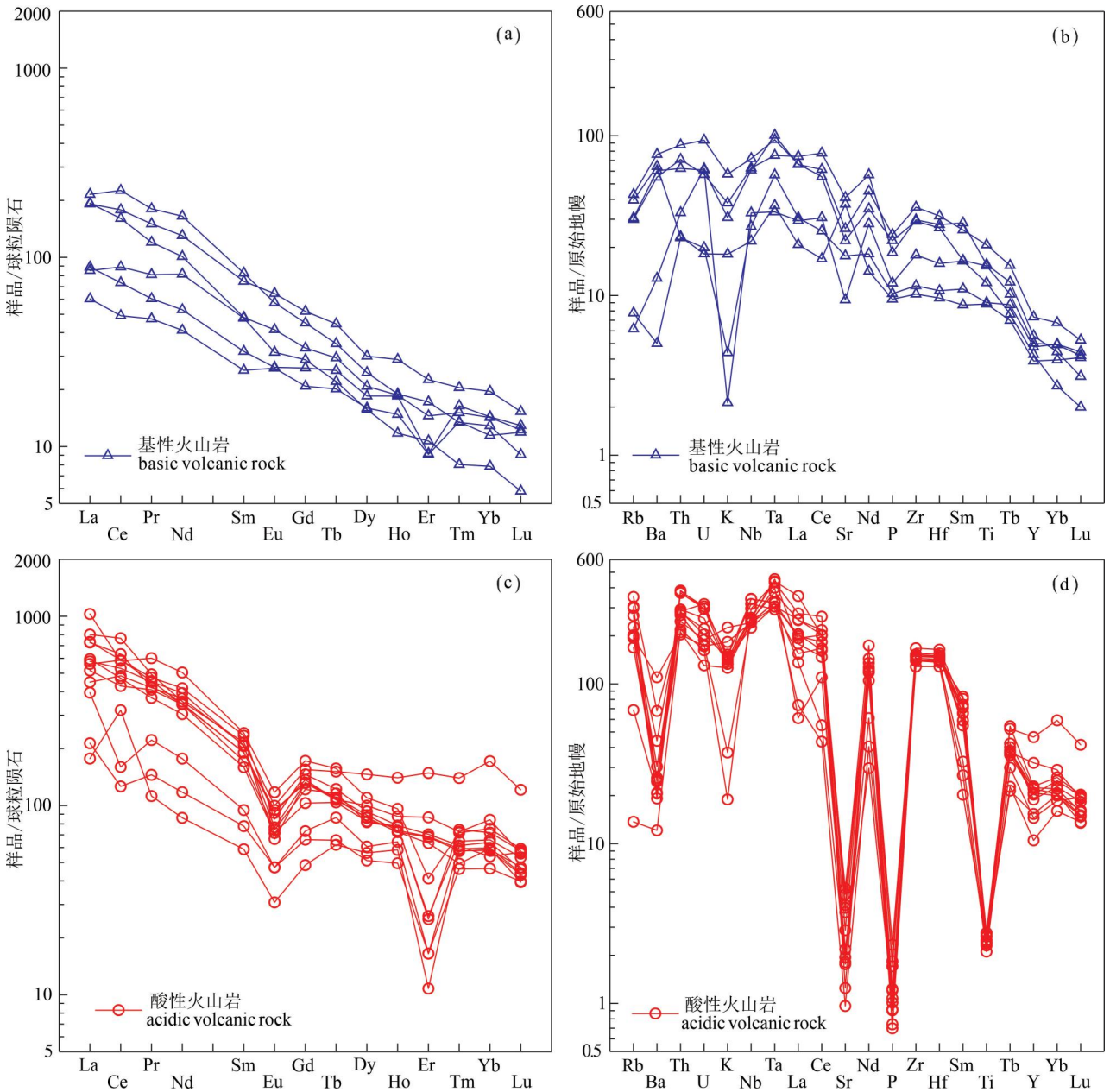

图 6 盐源柏林山地区火山岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)
(标准化数值据 Sun & McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE distribution pattern (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) of volcanic rocks in Mount Bailin area, Yanyuna (normalization values after Sun & McDonough, 1989)

6b、6d)可知,基性火山岩与酸性火山岩在微量元素方面存在明显的差异。基性火山岩曲线基本一致,总体表现为相对富集 U、Th、Nb、Ta 等高场强元素(HFSE)及轻稀土元素(LREE),相对亏损 Rb、K、Sr 等大离子亲石元素(LILE)及重稀土元素(HREE)(图 6b);基性火山岩的 Ni、Cr 含量分别为 45.7×10^{-6}~376×10^{-6}、75.2×10^{-6}~701×10^{-6} 均明显低于球粒陨石中的含量(Ni=2000×10^{-6},Cr=3000×10^{-6})(Taylor, 1985),表现出明显的亏损,反映了基性岩浆经受过较低程度的结晶分离作用。与基性火山岩相比较,酸性火山岩除 Ba、K、Sr、P、Ti 严重亏损外,其他元素均表现出不同程度的富集,其中 U、Th、Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素(HFSE)、轻稀土元素(LREE)及大离子亲石元素(LILE)Rb 表现出显著的富集特征(图 6d);酸性火山岩的 Ni、Cr 含量极低(Ni=0.574×10^{-6}~3.11×10^{-6}, Cr=1.31~6.49×

10^{-6}),表现出显著的亏损,Rb/Sr 值(0.331~5.99,均值 2.56)大于 0.5,表明其为经过强烈结晶分离作用后的岩浆形成(杨瑞瑛等,1985;赵振华,1997)。

5　讨论

5.1　岩石成因

玄武岩起源于地幔橄榄岩的部分熔融(O'Hara, 1965),经历了结晶分异、同化混染作用的残余岩浆形成。峨眉山玄武岩的岩石类型分为高钛与低钛两类玄武岩,可能是不同地幔源区在不同条件下的熔融产物,低钛玄武岩有关的地幔可能是地幔热柱轴部熔融的产物,而高钛玄武岩的母岩浆代表了热柱边部或消亡期地幔小程度部分熔融的产物(徐义刚等,2001;宋谢炎等,2001;张招崇等,2006)。研究区内玄武岩 MgO 含量(2.28%~9.76%,均值 5.59%)和 $Mg^{\#}$ 值(0.24~0.58,均值 0.41)小于地幔源区产生的玄武质初始岩浆 MgO 含量和 $Mg^{\#}$ 值(MgO>8%,$Mg^{\#}$ 0.67~0.73)(McKenzie and Bickle, 1988),暗示其可能经历后期结晶分异或地壳物质混染;区内玄武岩 Nb/Th 值(6.89~9.85,均值 8.10)有轻微的起伏变化,但其均值略高于原始地幔值(>8)(Glazner et al., 1991),表明区内高钛玄武岩浆遭受地壳物质混染作用不强烈。

双峰式火山岩酸性岩的成因存在两种主要观点:一种观点认为酸性岩和基性岩可分别来自不同的母岩浆,二者在空间上的共生可能仅仅与一次热事件有关,酸性岩由地壳深熔作用形成,生成的酸性岩通常比基性岩大得多;另一种观点认为酸性岩和基性岩可以具有共同的幔源母岩浆,酸性岩经基性岩浆分离结晶作用形成的,只有微量或根本没有陆壳物质的加入,形成的酸性岩比基性岩小得多(王焰等,2000;邵辉等,2007)。区内基性火山岩与酸性火山岩具有相似的稀土配分模式和微量元素分布特征,说明两者之间存在同源关系;由于 Nb、Ta、Zr、Hf、Th 等强不相容元素,具有相似的地球化学性质,其亲岩浆性的变化是同步的,Nb/Ta、Zr/Hf、Th/Hf、Zr/Nb、Ta/Hf 等元素对比值在部分熔融和结晶过程中基本不变(邵辉等,2007),区内 Nb—Ta、Zr—Hf、Th—Hf、Zr—Nb 相关系数分别为 0.90、0.96、0.91、0.97、0.95,表现出良好的线性关系,也表明基性火山岩和酸性火山岩具有同源性。在 Harker 图解上(图 5),可以看出区内基性火山岩与酸性火山岩在 SiO_2—CaO、SiO_2—FeO^T、SiO_2—MgO、SiO_2—P_2O_5、SiO_2—TiO_2 之间表现为负相关且有较好的线形关系,说明酸性火山岩可能由基性火山岩通过同化混染和分离结晶作用(AFC)演化形成;Th/Nb(均值 0.125)、Th/Ta(均值 1.71)、Nb/Ta(均值 13.57)分别与原始地幔比值(0.114、1.60、14.00)(Taylor, 1985)相近,说明酸性岩在成矿过程中受地壳混染程度较小。野外调查结果显示区内碱流岩、流纹岩规模明显小于玄武岩,出露面积之比约为 1∶20,厚度之比约为 1∶10,并结合区域构造环境、岩石的地球化学特征分析,认为区内碱流岩、流纹岩主要为玄武岩浆极度分离结晶后的酸性残余岩浆形成。

5.2　构造环境

研究区内主要为高钛玄武岩,其 Zr/Nb、Th/Nb、Th/La、La/Nb、Rb/Nb、Ba/La 等强不相容元素比值与 Weaver(1991)总结的 EMI OIB 和 EMⅡ OIB 比值相近,与云南宾川高钛玄武岩具有相似的地球化学特征(肖龙等,2003),在 Th/Yb—Ta/Yb 双变量图解中样品投影点落于板内富集型地幔区域(图 7a),说明基性火山岩产生于洋岛构造环境,来自于源生的或富集型地幔源区,而非亏损型地幔源区(侯增谦等,1999;宋谢炎等,2002),在 Th/Hf—Ta/Hf 大地构造环境判别图上样品投影点落于地幔柱玄武岩和陆内裂谷碱性玄武岩区(图 7b),说明玄武岩形成的大地构造环境与地幔柱活动和陆内裂谷拉张作用有关。

研究区内酸性火山岩主要为碱流岩,通常认为由酸度小的碱性花岗质岩浆喷发形成,其元素化学特征表现为富硅、碱,贫钙、镁、铝,$(K_2O+Na_2O)/Al_2O_3$ 和 FeO^T/MgO 值高,富集 Rb、Th、Nb、Ta、Zr、Hf、Ga、Y,贫 Sr、Ba、Cr、Co、Ni、V,稀土富集且有明显的负 Eu 异常,具有 A 型花岗质岩地球化学元素分布特征(贾小辉等,2009),在 Whalen 等(1987)提出的(Zr+Nb+Ce+Y)—FeO^T/MgO 判别图上样品投影点均落在 A 型花岗岩区域(图 8a);根据岩石化学组分将 A 型花岗岩划分为不同构造背景和来源不同的 A1 和 A2 两类,在 Y/Nb—Sc/Nb 判别图上样品投影点几乎全面落在裂谷、地幔柱和热点环境区域(A1)(图 8b),与洋岛玄武岩(OIB)具有相似的元素比值特征,代表起源于地幔并侵位于大陆裂谷或板内岩浆活动期间的岩浆分异,形成与裂谷、地幔柱或热点环境有关(Eby, 1992);在 Pearce et al(1984)提出的 Y—Nb 构造判别图上样品投影点均落在板内花岗岩区(图 8c),也反映区内酸性火山岩形成于板内构造环境,通过对区内玄武岩与碱流岩的时间关系及其地球化学特征分析,其形成环境与

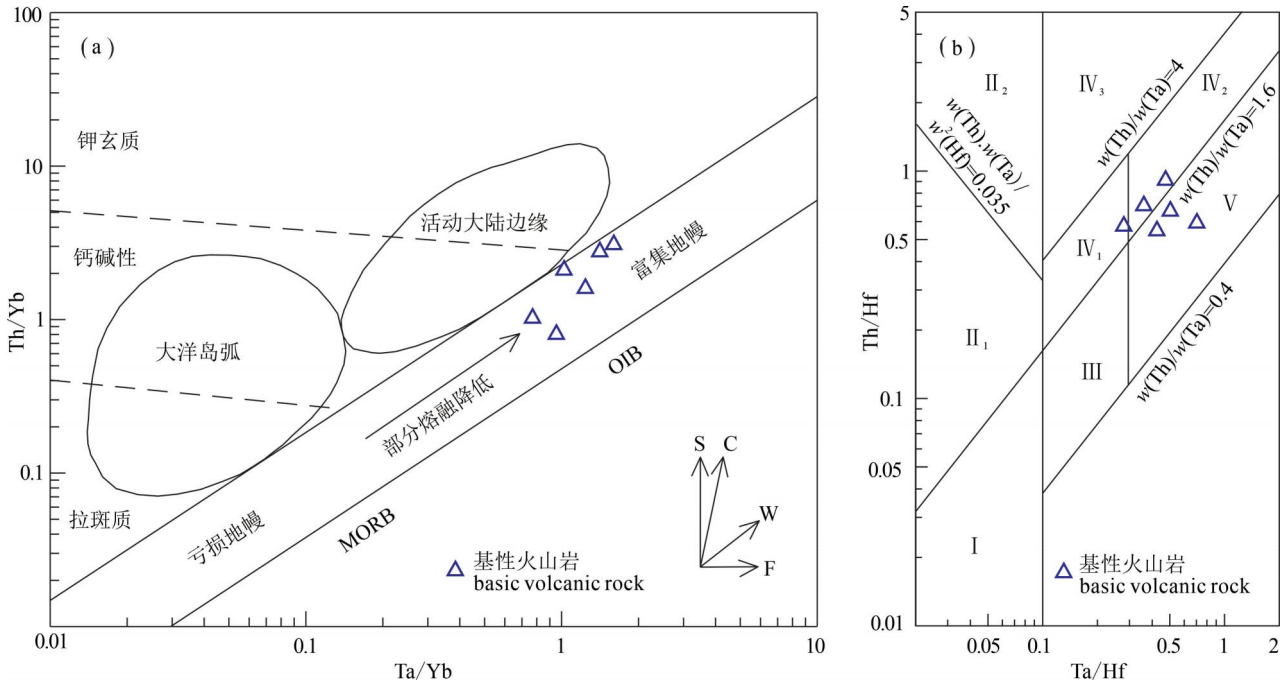

图 7 盐源柏林山地区玄武岩 Th/Yb—Ta/Yb(a;据肖龙等,2003)和 Th/Hf—Ta/Hf 判别图解(b;据汪云亮等,2001)

Fig. 7 Identification diagram of Ta/Yb—Th/Yb (a, after Xiao Long et al., 2003&) and Th/Hf—Ta/Hf (b, after Wang Yunliang et al., 2001&) for the Emeishan basalts in Mount Bailin area, Yanyuna

MORB—大洋中脊玄武岩;OIB—洋岛玄武岩;C—地壳混染;W—板内富集;F—分离结晶作用;S—俯冲组份的影响;Ⅰ—板块发散边缘 N-MORB 区;Ⅱ—板块汇聚边缘(Ⅱ$_1$—大洋岛弧玄武岩区;Ⅱ$_2$—陆缘岛弧及陆缘火山弧玄武岩区);Ⅲ—大洋板内洋岛、海山玄武岩区及 T-MORB、E-MORB 区;Ⅳ—大陆板内(Ⅳ$_1$—陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区;Ⅳ$_2$—陆内裂谷碱性玄武岩区;Ⅳ$_3$—大陆拉张带(或初始裂谷)玄武岩区);Ⅴ—地幔热柱玄武岩区

MORB—mid-ocean-ridge basalt; OIB—ocean-island basalt; C—crustal contamination; W—within plate enrichment; F—fractional crystallization; S—subduction component Influence; Ⅰ—N-MORB area of plate divergence edge; Ⅱ—plate convergence edge(Ⅱ$_1$—ocean island arc basalt area; Ⅱ$_2$—marginal island arc and marginal volcanic arc basalt area); Ⅲ—ocean island, seamount basalt area and T-MORB, E-MORB area; Ⅳ—continental intraplate(Ⅳ$_1$—intracontinental rift and continental margin rift tholeiitic basalt zone; Ⅳ$_2$—intracontinental rift alkaline basalt zone; Ⅳ$_3$—continental extensional zone(or initial rift) basalt zone); Ⅴ—mantle plume basalt area

地幔柱活动有关(钟玉婷等,2009)。目前对 A 型花岗岩的形成构造环境还存在争议,但其形成于伸展的构造背景的观点得到了普遍认同,因此,认为区内酸性火山岩形成于峨眉山地幔柱上升导致板内拉张的构造环境。

5.3 地质意义

前人对峨眉山玄武岩及顶部酸性岩的地质年龄作了大量的研究,显示峨眉山火山活动始于约 260 Ma(秦江锋等,2021;Xu Yigang et al., 2008; 刘成英等,2009),主要喷发时限在 258~259 Ma,持续时间很短(小于 1 Ma),顶部的酸性火山岩年龄为 258.1~258.6 Ma(徐义刚等,2013);在开展 1∶5 万盐源幅区域地质调查过程中,对柏林山地区玄武岩进行 LA-ICP- MS U-Pb 同位素测年,其加权平均年龄为 253.8±8.4 Ma(唐广成等,2021),表明该区域内玄武岩形成于晚二叠纪长兴期,位于其顶部的酸性岩形成时代更晚。虽然前人获到的年龄数据有所不同,但是玄武岩及酸性岩形成于晚二叠纪观点是一致的。通过本次野外调查,研究区内玄武岩和酸性火山岩赋存于阳新组(P_2y)与黑泥哨组(P_3h)之间,且玄武岩与酸性火山岩之间为整合接触,表明其形成时代为晚二叠纪无疑。双峰式火山岩套可以形成于大陆裂谷、洋内岛弧、活动大陆边缘、弧后盆地、造山后、大陆拉张减薄、成熟岛弧等多种环境(钱青等,1999;王焰等,2000),本次在峨眉山玄武岩顶部新发现较大规模的酸性火山岩(碱流岩、流纹岩)分布,与玄武岩构成了典型的双峰式火山岩组合,综合研究表明晚二叠纪峨眉山地幔柱活动为区内双峰式

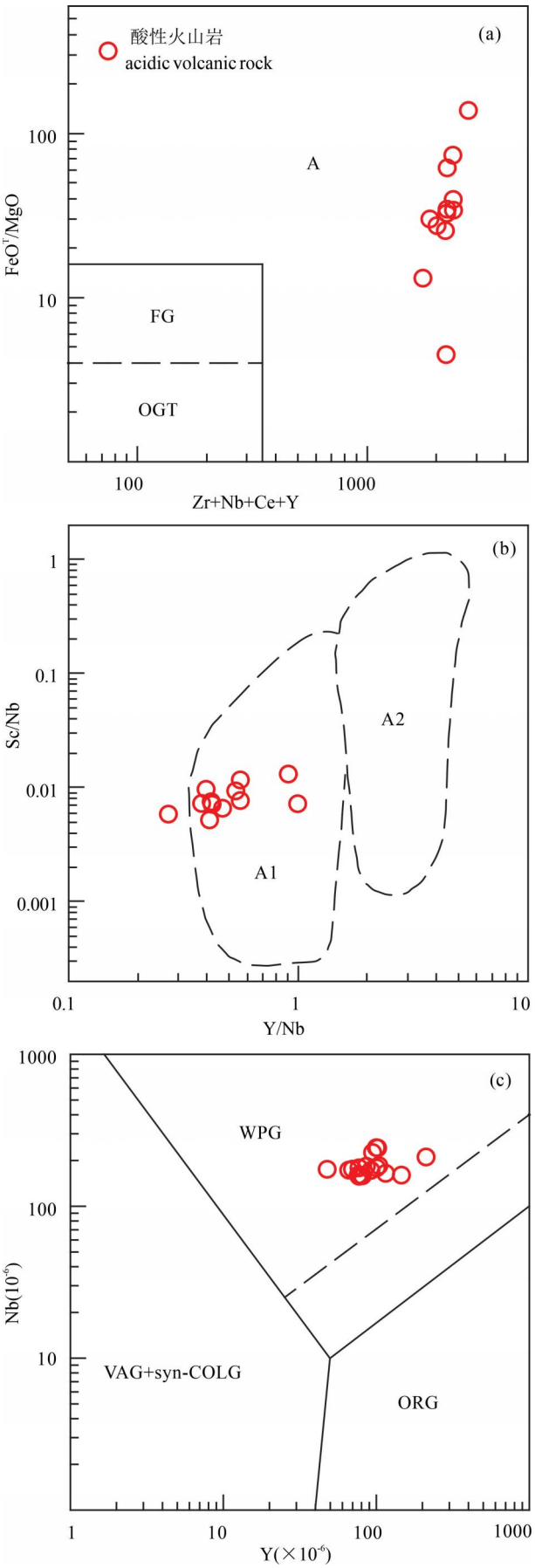

图 8 盐源柏林山地区碱流岩(Zr+Nb+Ce+Y)—FeO^T/MgO(a,据 Whalen et al., 1987)、Y/Nb—Sc/Nb(b,据 Eby, 1992)和 Y—Nb(c,据 Pearce et al., 1984)判别图解

Fig. 8 Identification diagram of (Zr+Nb+Ce+Y)—FeO^T/MgO (a, after Whalen et al., 1987), Y/Nb—Sc/Nb (b, after Eby, 1992) and Y—Nb (c, after Pearce et al., 1984) for the pantellerites in Mount Bailin area, Yanyuna

A—A 型花岗岩;FG—长英质花岗岩;OGT—未分 M、I 和 S 型花岗岩;A1—裂谷、地幔柱和热点环境 A 型花岗岩;A2—后碰撞、后造山和非造山环境 A 型花岗岩;WPG—板内花岗岩;ORG—洋脊花岗岩;VAG—火山弧花岗岩;syn-COLG—同碰撞花岗岩

A—A-type granite; FG—felsic granite; OGT—unfractionated M-type, I-type and S-type granite; A1—A-type granite from rift, plume, and hotspot environments; A2—A-type granite from postcollisional, postorogenic and anorogenic environments; WPG—within plate granite; ORG—ocean ridge granite; VAG—volcanic arc granite; Syn-COLG—syn-collision granite

火山岩的形成提供了充足地幔物源,同时为其喷溢、成岩提供了构造动力和生成空间,致使区内双峰式火山岩表现出地幔柱活动和大陆拉张裂谷的双重构造环境特征。因此,对本区双峰式火山的岩石组合、地球化学特征、岩石成因以及形成构造环境的研究为进一步佐证峨眉山地幔柱活动提供了依据,同时对研究 ELIP 的区域地质演化提供了一个重要的窗口。

以往对 ELIP 的成矿研究主要集中于岩浆型、岩浆—岩浆热液型及热液—热液改造型矿床,如岩浆熔离 Ni—Cu—(PGE)硫化物矿床、V—Ti 磁铁矿矿床、玄武岩型铜矿、Pb—Zn 矿床、卡林型金矿等(张成江等,2004;肖龙等,2007),而对 ELIP 内双峰式火山岩的酸性火山岩有关成矿研究还很少。区内碱流岩、流纹岩中稀土、铌、钽、镓等元素具有显著富集特征,对其是否能独立成矿以及能否次生成矿值得进一步关注;近年来在川、滇、黔一带的宣威组底部发现了多处稀土、铌、镓等稀有稀土元素富集层,普遍认为其成矿物源来主要来自峨眉山玄武岩,本区发现玄武顶部广泛分布厚大的酸性火山岩,显示出晚二叠纪峨眉山玄武岩喷发晚期存在大规模的酸性岩浆喷发,因而为该类型矿床的成矿物源分析及找矿工作提供了一种新的启示。

6　结论

(1)四川省盐源县柏林山一带峨眉山玄武岩顶部广泛分布有碱流岩,时空上两者相生相伴,具有明显的 Daly 成分间断,构成典型的双峰式火山岩组

合,为晚二叠纪峨眉山地幔柱活动的产物。

(2)区内玄武岩主要为高钛玄武岩,为地幔热柱边部或消亡期地幔小程度部分熔融的产物,碱流岩具有 A 型花岗岩特征,主要为玄武岩浆极度分离结晶后的酸性残余岩浆形成,两者在形成过程中受地壳混染程度较小。

(3)区内双峰式火山岩的成因均与峨眉山地幔柱活动有关,玄武岩浆来自于富集型地幔源区,形成于洋岛构造环境,碱流岩形成于板内拉张环境。

(4)区内发现的双峰式火山岩具有典型的岩石组合、所处大地构造位置特殊,对区域构造演化、成矿地质研究以及拓展找矿思路具有重要意义。

致谢:在野外调查、综合研究和论文撰写期间,得到了盛东劲高级工程师、唐学渊教授级高级工程师和仲佳爱高级工程师的指导和支持,同时,审稿专家对论文提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

邓晋福, 刘翠, 冯艳芳 , 肖庆辉, 狄永军, 苏尚国, 赵国春, 段培新, 戴蒙. 2015. 关于火成岩常用图解的正确使用: 讨论与建议. 地质论评, 61(4): 717~734.

葛肖虹. 1984. 川西盐源推覆构造的探讨. 长春地质学院学报, (1): 36~43.

何斌, 徐义刚, 肖龙, 王康明, 沙绍礼. 2003. 峨眉山大火成岩省的形成机制及空间展布: 来自沉积地层学的新证据. 地质学报, 77(2): 194~202.

侯增谦, 卢记仁, 汪云亮, 夏林圻, 李红阳, 国连杰. 1999. 峨眉火成岩省: 结构、成因与特色. 地质论评, 45(S1): 885~891.

贾小辉, 王强和唐功建. 2009. A 型花岗岩的研究进展及意义. 大地构造与成矿学, 33(3): 465~480.

林建英. 1987. 峨眉山玄武岩系的岩石组合及其地质特征[C]//中国地质科学院成都地质矿产研究所所刊(8). 北京: 地质出版社, 109~122.

刘成英, 朱日祥. 2009. 试论峨眉山玄武岩的地球动力学含义. 地学前缘, 16(2): 52~69.

刘家铎, 刘文周. 1995. 盐源盆地演化及早三叠世青天堡组沉积环境. 成都理工学院学报, 22(3): 70~74.

刘林, 杨瑞英. 1983. 康滇构造带暗色岩套和双峰式火山岩套的稀土元素含量及其生成的大地构造环境. 地质地球化学, (5): 58~59+29.

卢记仁. 1999. 峨眉山地幔柱的动力学特征. 地球学报, 17(4): 424~438.

潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分. 中国地质, 36(1): 1~26.

钱青, 王焰. 1999. 不同构造环境中双峰式火山岩的地球化学特征. 地质地球化学, 27(4): 29~32.

秦江锋, 赖绍聪, 张泽中, 郑国顺. 2021. 峨眉山大火成岩省内带中酸性岩浆岩对地幔柱岩浆过程及地壳熔融机制的启示. 西北大学学报(自然科学版), 51(6): 1031~1041.

邵辉, 徐义刚, 何斌, 黄小龙, 罗震宇. 2007. 峨眉山大火成岩晚期酸性火山岩的岩石地球化学特征. 矿物岩石地球化学通报, 26(4): 350~358.

沈发奎, 刘林. 1984. 攀枝花裂谷支双峰式火山岩. 矿物岩石, (1): 1~15.

宋谢炎, 侯增谦, 曹志敏, 卢纪仁, 汪云亮, 张成江, 李佑国. 2001. 峨眉大火成岩省的岩石地球化学特征及时限. 地质学报, 75(4): 498~506.

宋谢炎, 侯增谦, 汪云亮, 张成江, 曹志敏, 李佑国. 2002. 峨眉山玄武岩的地幔热柱成因. 矿物岩石, 22(4): 27~32.

唐广成, 张璐. 2021. 四川盐源地区峨眉山玄武岩喷发旋回及意义. 四川地质学报, 41(S2): 21~25.

汪云亮, 张成江, 修淑芝. 2001. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf—Ta/Hf 图解判别. 岩石学报, 17(3): 413~421.

王焰, 钱青, 刘良, 张旗. 2000. 不同构造环境中双峰式火山岩的主要特征. 岩石学报, 16(2): 169~173.

王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 1989. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1~535.

肖龙, Pirajno F, 何琦. 2007. 试论大火成岩省与成矿作用. 高校地质学报, 13(2): 148~160.

肖龙, 徐义刚, 梅厚钧, 沙绍礼. 2003. 云南宾川地区峨眉山玄武岩地球化学特征: 岩石类型及随时间演化规律. 地质科学, 38(4): 478~494.

徐义刚, 何斌, 罗震宇, 刘海泉. 2013. 我国大火成岩省和地幔柱研究进展与展望. 矿物岩石地球化学通报, 32(1): 25~39.

徐义刚, 钟孙霖. 2001. 峨眉山大火成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件. 地球化学, 30(1): 1~9.

杨瑞瑛, 黄忠祥, 李继亮. 1985. 攀西裂谷火成岩组合的微量元素地球化学. 中国科学, (9): 844~854.

张成江, 刘家铎, 刘显凡, 阳正熙, 李佑国, 吴德超. 2004. 峨眉火成岩省成矿效应初探. 矿物岩石, 24(1): 5~9.

张云湘, 骆耀南, 杨崇喜. 1988. 攀西裂谷[M]. 北京: 地质出版社, 1~466.

张招崇, Mahoney J J, 王福生, 赵莉, 艾羽, 杨铁铮. 2006. 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. 岩石学报, 26(6): 1538~1552.

张招崇. 2009. 关于峨眉山大火成岩省一些重要问题的讨论. 中国地质, 36(3): 634~646.

赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1~238.

钟玉婷, 徐义刚. 2009. 与地幔柱有关的 A 型花岗岩的特点—以峨眉山大火成岩省为例. 吉林大学学报(地球科学版), 39(5): 828~838.

朱靓, 郗爱华, 王挽琼, 钟祥, 吴垚墅. 2017. 四川攀枝花二叠纪双峰式火山岩地球化学特征及其地质意义. 世界地质, 36(2): 452~459.

左群超, 叶天竺, 冯艳芳, 葛佐, 王英超. 2006. 中国陆域 1∶25 万分幅建造构造图空间数据库(DB/OL). 中国地质调查局发展研究中心, [2022-12-26]. http://dcc.ngac.org.cn/geologicalData/rest/geologicalData/geologicalDataDetail/8adaeff963f2eb2a0163f335b7600019.

Chung Sunlin, Jahn Borming. 1995. Plume—lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian—Triassic boundary. Geology, 23(10): 889~892.

Daly R A. 1925. The geology of Ascension Island. Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, 60(1): 3~80.

Davids G R, Macdonald R. 1987. Crustal influences in the petrogenesis

of the Naivasha basalt—comendite complex: Combined trace element and Sr—Nd—Pb isotope constraints. Journal of Petrology, 28(6): 1009~1031.

Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Di Yongjun, Su Shangguo, Zhao Guochun, Duan Peixin, Dai Meng. 2015&. On the correct application in the common igneous petrological diagrams: Discussion and suggestion. Geological Review, 61(4): 717~734.

Eby G N. 1992. Chemical subdivsion of the A-type granitoids: Pertogenetic and tectonic implications. Gology, 20(7): 641~644.

GeXiaohong. 1984&. A discussion on nappe structure in Yanyuan, west Sichuan. Journal of Jilin University, (1): 36~43.

Glazner A F, Farmer G L, HughesW T, Wooden J L, Pickthorn William. 1991. Contamination of Basaltic Magma by Mafic Crust at Amboy and Pisgah Craters, Mojave Desert, California. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 96(8): 13673~13691.

He Bin, Xu Yigang, Huang Xiaolong, Luo Zhenyu, Shi Qijun, Yu Songyue. 2007. Age and duration of the Emeishan flood volcanism, SW China: Geochemistry and SHRIMP zircon U - Pb dating of silicic ignimbrites, post-volcanic Xuanwei Formation and clay tuff at the Chaotian section. Earth and Planetary Science Letters, 255(3): 306~323.

He Bin, XuYigang, Xiao Long, Wang Kangming, Sha Shaoli. 2003&. Generation and spatial distribution of the Emeishan large igneous province: new evidence from stratigraphic records. Acta Geologica Sinica, 77(2): 194~202.

Hou Zengqian, LU Jiren, Wang Yunliang, Xia Linqi, Li Hongyang, Guo Lianjie. 1999&. Emei large igneous province: characteristics and origin. Geological Review, 45(S1): 885~891

Jia Xiaohui, Wnag Qinag, Tang Gongjian. 2009&. A-type granites: research progress and implications. Geotectonica et Metallogenia, 33(3): 465~480.

Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, Zanettin B. 1986. A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali—Silica Diagram. Journal of Petrology, 27(3): 745~750.

Lin Jinaying. 1987&. Rock association and geological character of the Emeishan baslts[C]//Bull. Chengdu inst. Geol. M. R. , Chinese Acad. Geol. Sci(8). Beijin: Geological Publishing House, 109~122.

Liu Chengying, Zhu Rixiang. 2009&. Discussion on geodynamic significance of the Emeishan basalts. Earth Science Fronters, 16(2): 52~69.

Liu Jiaduo, Liu Wenzhou. 1995&. The evolution of Yanyuan basin and the sedimentary environment of the early triassic Qingtianbao Group. Journal of Chengdu Institute of Technology, 22(3): 70~74.

Liu Lin, Yang Ruiying. 1983#. The rare earth element content of dark rock suite and bimodal volcanic suite in Kangdian tectonic belt and its tectonic environment. Geology—Geochemistry, (5): 58~59+29.

Lu Jiren. 1999&. Dynamicla characteristics of the Emei mantle plume. Acta Geoscientia Sinica, 17(4): 424~438.

McKenzie D, Bickle M J. 1988. The Volume and Composition of Melt Generated by Extension of the Lithosphere. Journal of Petrology, 29(3): 625~679.

Middlemost E A K. 1972. A simple classification of volcanic rocks. Bulletin Volcanologique, 36(2): 382~397.

O'Hara M J. 1965. Primary magmas and the origin of basalts. Scottish Journal of Geology, 1(1): 19~40.

Pearce Julian A, Harris Nigel B W, Tindle Andrew G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 25(4): 956~983.

Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, Den Jinfu, Feng Yimin, Zhang Kexin, Zhang Zhiyong, Wang Fangguo, Xing Guangfu, Hao, Guojie, Feng Yanfang. 2009&. Subdivision of tectonic units in China. Geology in China, 36(1): 1~26.

Qian Qing, Wang Yan. 1999&. Geochemical characteristics of bimodal volcanic suites from different tectonic settings. Geology—Geochemistry, 27(4): 29~32.

Qin Jiangfeng, Lai Shaocong, Zhang Zezhong, Zheng Guoshun. 2021&. Intermediate—telsic igneous rocks from the inner zone of the Emeishan large igneous province(ELIP): Implication for the mantle plume magmatic process and crust melting meckanismJournal of Northwest University(Natural Science Edition), 51(6): 1031~1041.

Shao Hui, Xu Yigang, He Bin, Huang Xiaolong, Luo Zhenyu. 2007&. Petrology and geochemistry of the late-stage acidic volcanic rocks of the Emeishan large igneous provinceBulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 26(4): 350~358.

Sheng FaKui, Liu Di. 1984&. The bimodal volcanic rocks in the Panzhihua branch rift. Mineralogy and Petrology, (1): 1~15.

Song Xieyan, Hou Zengqian, Cao Zhimim, Lu Jiren, Wang Yunliang, Zhang Chengjiang, Li Youguo. 2001&. Geochemical characteristics and period of the Emei igneous province. Acta Geologica Sinica, 75(4): 498~506.

Song Xieyan, Hou Zhengqian, Wnag Yunliang, Zhang Chengjiang, Cao Zhimin, . Li Youguo. 2002&. The mantle plume features of Emeishan basalts. Mineralogy and Petrology, 22(4): 27~32.

Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313~345.

Tang Guangcheng, Zhang Lu. 2021&. Eruption cycle of Emeishan basalt and its significance in Yanyuan, Sichuan. Acta Geologica Sichuan, 41(S2)21~25.

Taylor S R, Mclennan S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution. The Journal of Geology, 94(4): 57~72.

Wang Yan, Qian Qing, Liu Liang, Zhangqi. 2000&. Major geochemical characteristics of bimodal volcanic rocks in different geochemical environments. Acta Petrologica Sinica, 16(2): 169~173.

Wang Yunliang, Zhang Chengjiang, Xiu Shuzhi. 2001&. Th/Hf—Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts. Acta Petrologica Sinica, 17(3): 413~421.

Wang Zonggang, Yu Xueyan, Zhao Zenghua, et al. 1989#. Rare earth element geochemistry[M]Beijin: Science Press, 1~535.

Weaver B L. 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints. Earth and Planetary Science Letters, 104(24): 381~397.

Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contributions to Mineralogy & Petrology, 95(4): 407~419.

Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, 20: 325~343.

Wright J B. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis. Geological Magazine, 106(4): 370~384.

Xiao Long, Xu Yigang, Mei Houjun, Sha Shaoli. 2003&. Geochemistry

of Emeishan flood basalts at Binchuan area, SW China: rock types and temporal evolution. Chinese Journal of Geology, 38(4): 478~494.

Xiao Long, Pirajno F, He Qi. 2007&. A preliminary discussion on large igneous provinces and associated ore deposits. Geological Journal of China Universities, 13(2): 148~160.

Xu Yigang, Chung Sunlin, Jahn Borming, Wu Genyao. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian—Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China. Lithos, 58: 145~168.

Xu Yigang, Chung Sunlin. 2001&. The Emeishan large igneous province: evidence for mantl plume activety and melting conditions. Geochimica, 30(1): 1~9.

Xu Yigang, He Bin, Chung Sunlin, Menzies Martin A., Frey F A. 2004. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province. Geology, 32(10): 917~920.

Xu Yigang, Luo Zhenyu, Huang Xiaolong, He Bin, Xiao Long, Xie Liewen, Shi Yuruo. 2008. Zircon U - Pb and Hf isotope constraints on crustal melting associated with the Emeishan mantle plume. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72(13): 3084~3104.

Xu Yigang, Chung sunlin, Shao Hui, He Bin. 2010. Silicic magmas from the Emeishan large igneous province, Southwest China: Petrogenesis and their link with the end-Guadalupian biological crisis. Lithos, 119: 47~60.

Xu Yigang, He Bin, Luo Zhenyu, Liu Haiquan. 2013&. Study on mantle plume and large igneous province in China: an overview and perspectives. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 32(1): 25~39.

Yang Ruiying, Huang Zhongxiang, Li Jiliang. 1985#. Trace element geochemistry of igneous rock assemblage in Panxi rift. Scientia Sinica, (9): 844~854.

Zhang Chengjiang, Liu Jiaduo, Liu Xianfan, Yang Zhengxi, Li Youguo, Wu Dechao. 2004&. Primary discussion on ore-forming effect of Emei igneous province. Mineralogy and Petrology, 24(1): 5~9.

Zhang Yunxiang, Luo Yaonan, Yang Chongxi., et al. 1988&. Panzhihua—Xichang rift in China [M]. Beijin: Geological Publishing House, 1~466.

Zhang Zhaochong, Mahoney J J, Wang Fusheng, Zhao Li, Ai Yu, Yang Tiezheng. 2006&. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the western Emeishan flood basalt province, China: evidence for a plume-head origin. Acta Petrologica Sinica, 26(6): 1538~1552.

Zhang Zhaochong. 2009&. A discussion on some important problems concerning the Emeishan large igneous province. Geology in China, 36(3): 634~646.

Zhao Zhenhua. 1997#. Geochemical principle of trace elements [M]. Beijin: Science Press, 1~238.

Zhong Yutingm, Xu Yigang. 2009&. Characteristics of plume-related A-type granites: An example from the Emeishan large igneous province. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 39(5): 828~838.

Zhu Liang, Xi Aihua, Wang Wanqiong, Zhong Xiang, Wu Yaoye. 2017&. Geochemical characteristics and their geological significance of Permian bimodal volcanic rocks in Panzhihua, Sichuan. Global Geology, 36(2): 452~459.

Zuo Qunchao, Ye Tinazhu, Feng Yanfang, Ge Zuo, Wang Yingchao. 2006&. Spatial Database of Serial Suite-Tectonic Map-sheets of Mainland China (1 : 250, 000) [DB/OL] Development Research Center of China Geological Survey, [2022-12-26]. http://dcc.ngac.org.cn/geologicalData/rest/geologicalData/geologicalDataDetail/8adaeff963f2eb2a0163f335b7600019.

Definitionof Late Permian bimodal volcanic rocks in Yanyuan area of Sichuan Province and its geological significance

CHENG Jiankang, SUN Baowei, HUO Jiaqing, XIAO Liang, WANG Bin, ZHU Kaining

No. 405 *Geological Team of Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources*, *Chengdu*, 611830

Objectives: This paper focuses on the study of petrology and geochemistry of the newly discovered bimodal volcanic rock assemblage in Mount Bailin area, Yanyuan County, Sichuan Province, and discusses its petrogenesis and tectonic geological background, which provides new clues and geological basis for further research on the formation mechanism, tectonic evolution and mineralization of Emeishan large igneous province.

Methods: On the basis of field investigation, representative samples of basic and acid volcanic rocks were collected, and the bimodal volcanic rocks were studied by microscopic observation, analysis of major elements, trace elements and rare earth elements, and the petrogenesis and tectonic environment of the bimodal volcanic rocks were discussed.

Results: A bimodal volcanic rock composed of alkali-rich high-titanium basalt and pantellerite was newly discovered in Mount Bailin area of Yanyuan County, Sichuan Province. It belongs to a part of the Emeishan large igneous province and was formed in the late Permian. Both basalt and pantellerite are characterized by light rare earth enrichment. The rare earth content and fractionation degree in pantellerite are significantly higher than those in basalt, and pantellerite shows obvious negative Eu anomaly. The basalts are relatively enriched in high field

strength elements such as U, Th, Nb and Ta, and relatively depleted in large ion lithophile elements such as Rb, K and Sr. The pantellerite are significantly enriched in high field strength elements such as U, Th, Nb, Ta, Zr and Hf, and severely depleted in Ba, K, Sr, P, Ti, Ni and Cr. Basalt is the product of partial melting of mantle peridotite to a small extent. Pantellerite is mainly formed by acidic residual magma after extreme separation and crystallization of basaltic magma. The basalt were formed in the oceanic island environment, and the pantellerite were formed in the intracontinental extensional environment. The tectonic environment is related to the activity of the Emeishan mantle plume and the intracontinental rift extension by it.

Conclusions: The definition of the late Permian bimodal volcanic rocks in Mount Bailin area, Yanyuan County, Sichuan Province is of great significance for the study of regional tectonic evolution and mineralization and the expansion of prospecting ideas.

Keywords: bimodal volcanic rocks; Emeishan basalt; pantellerite; mantle plume; Yanyuan

Acknowledgements: This paper is the research result of Innovation Fund project (No. KJCX-2022-015) of No. 405 Geological Tem of Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources. During the field investigation, comprehensive research and paper writing, we received the guidance and support of professor-level senior engineer Tang Xueyuan, senior engineer Sheng Dongjin and senior engineer Zhong Jiai. At the same time, the reviewers put forward a lot of valuable comments on the paper. we hereby express our heartfelt thanks!

First author: CHENG Jiankang, male, born in 1968, master degree, senior engineer, mainly engaged in regional geological and mineral survey, geological and mineral exploration and evaluation; Email: 530838781@qq.com

Corresponding author: SUN Baowei, male, born in 1980, master degree, senior engineer, mainly engaged in geological and mineral exploration and evaluation work; Email: 41066946@qq.com

Manuscript received on: 2023-07-31; Accepted on: 2024-01-12; Published online on: 2024-01-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2024.01.065　　**Edited by**: ZHANG Yuxu