

文章编号:1004-4116(2023)04-0013-10

西秦岭北缘甘加—麻当地区玄武岩地球化学特征及成因探讨

梁志勇¹,李鹏举¹,焦世文^{1,2},鲁有朋¹

(1.甘肃省金属贵金属矿产资源勘查与综合利用工程技术研究中心,甘肃省地矿局第三地勘院,甘肃 兰州 730050;

2. 甘肃遥感地质中心,甘肃 兰州 730050)

摘 要:西秦岭北缘夏河县甘加—麻当地区零星分布有火山岩,通过对该地区玄武岩开展野外地质调查与室内元素地球化学测试,并进行分析研究表明甘加—麻当玄武岩属于一套钠质—钾质过渡的碱性玄武岩。玄武岩强烈富集大离子亲石元素Rb、W、Sr和高场强元素U、Nb、Ta、Hf,亏损Cs、Ba、Th等元素,显示出典型的OIB型特征,其形成环境为大陆板内环境,推测岩浆起源于亏损的软流圈地幔,其复杂的地球化学特征表明,岩浆经历了较为强烈的岩石圈—软流圈相互作用,与印支期造山运动后岩石圈拉伸有关。

关键词:西秦岭;甘加地区;麻当地区;玄武岩;地球化学;岩石成因

中图分类号:P588;P618

文献标志码:A

西秦岭造山带是我国中央造山带的重要组成部分,西连东昆仑造山带,北接祁连造山带,南邻青藏高原东北缘,位于古亚洲洋构造域、特提斯喜马拉雅构造域和滨太平洋构造域交汇之处(图1a),是多地体拼合衔接的重要部位,其形成经历了长期复杂的构造演化,是研究岩浆活动与造山作用的典型地区^[1-4]。造山运动往往是板块构造运动的结果,其形成过程中会伴随强烈的岩浆活动,为壳幔物质循环提供了构造环境。西秦岭造山带分布有大量的岩浆岩,其形成与板块拼合有着密切关系。玄武岩是地幔起源的岩浆在地表的直接产物,其岩石学、地球化学、年代学特征及岩浆起源、演化、构造环境等一直是学者们研讨的热点^[5-13]。对于西秦岭北缘甘加—麻当地区的玄武岩研究,亦有较多不一致的观点^[14-15],笔者通过野外地质调查工作,详细观察了玄武岩分布特征,并在玄武岩岩石学特征、稀土、微量元素地球化学特征分析基础上,确定了玄武岩的类型及系列,以野外详细观察为出发点,通过构造判别,对其形成环境、岩浆起源、演化以及其形成时间进行了探讨。

1 地质背景

研究区地层出露较为简单,从老到新依次为:早石炭世巴都组(C_1b),主要为灰色—灰白色石英砂岩、长石石英砂岩;中二叠世大关山组(P_2d)主要为灰—深灰色、灰白色厚层—块状泥晶灰岩、亮晶灰岩、角砾灰岩;晚二叠世石关组(P_3sh),主要为灰黑色、灰色中—薄层长石岩屑砂岩与灰色板岩互层夹少量的灰岩;早三叠世果木沟组(T_1g),主要为深灰色薄层灰岩与灰色、黑色泥质板岩、钙质粉砂质板岩,灰绿色、青灰色岩屑石英砂岩、长石石英砂岩,江里沟组(T_1j),为深灰色、灰色厚层含砾灰岩、砂质灰岩、粉砂质板岩、泥质板岩、岩屑石英砂岩、长石石英砂岩;中三叠世古浪堤组(T_2g),以灰色块状含砾灰岩、深灰色块状灰岩、灰色—灰绿色厚层—块状长石石英砂岩、灰黑色板岩为主;早白垩世河口群(K_1h),为灰红色—紫红色厚层—巨厚层复成分砾岩,夹中粗粒长石石英砂岩;新近纪甘肃群(NG)为紫红色砂岩、砖红色泥岩夹石膏层;第四系主要为河

收稿日期:2023-07-11

基金项目:本研究得到甘肃省科技计划(22YF7GA050)、中央引导地方科技发展资金项目(YDZX20216200001297)、甘肃省基础地质调查项目(4500689978)联合资助

作者简介:梁志勇(1990~),男,甘肃通渭,化探工程师,主要从事区域地质矿产调查工作,E-mail:1332014325@qq.com

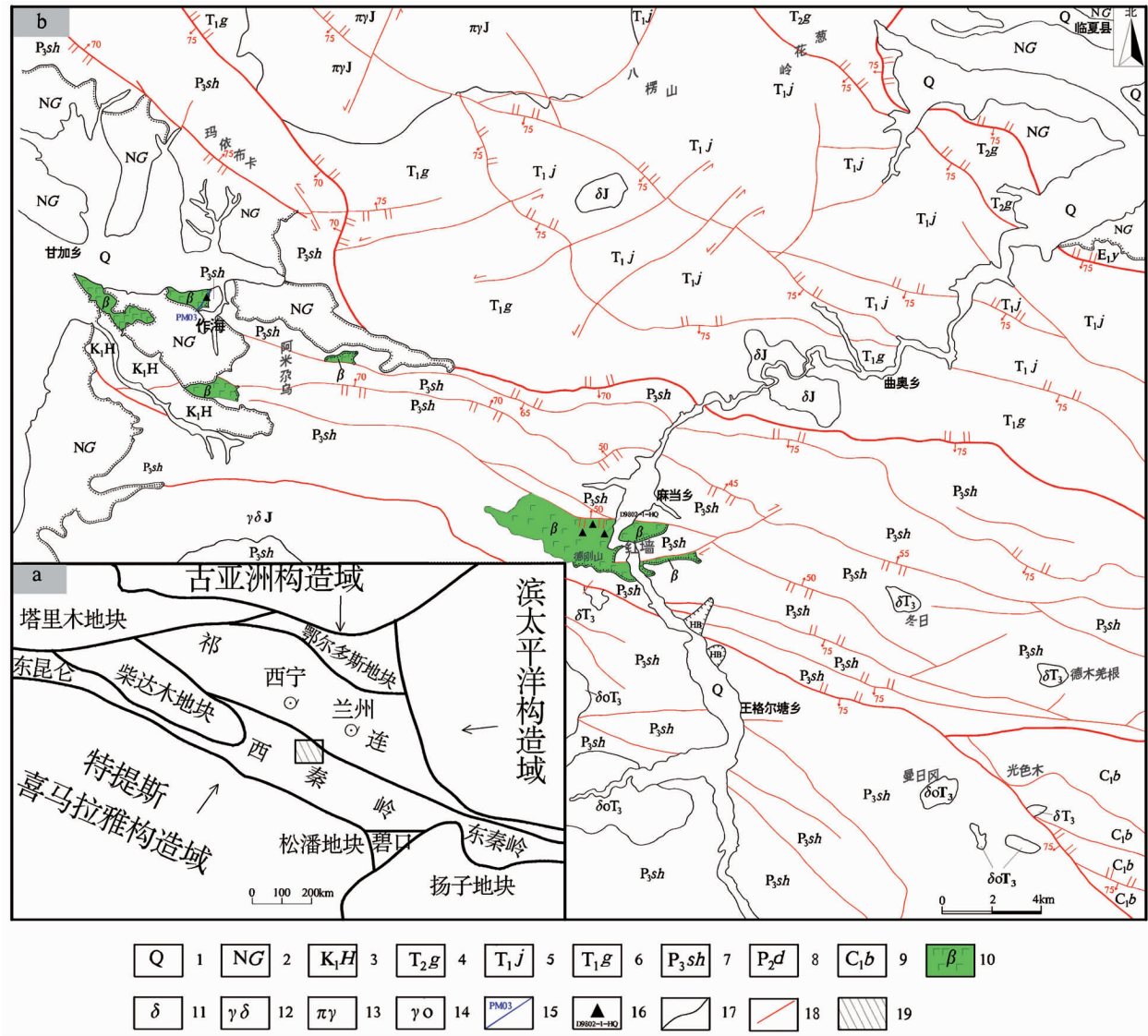


图 1 西秦岭造山带构造划分图(a)及研究区地质图(b)

Fig. 1 Geological sketch of the study area

1—第四系;2—新近系甘肃群;3—下白垩统河口群;4—中三叠统古浪堤组;5—下三叠统江里沟组;6—下三叠统果木沟组;
7—上二叠统石关组;8—中二叠统大关山组;9—下石炭统巴都组;10—玄武岩;11—闪长岩;12—花岗岩闪长岩;13—斑状花岗岩;
14—石英闪长岩;15—剖面位置及编号;16—路线采样点位置及编号;17—地质界线;18—断层界线;19—研究区

流冲洪积物。研究区 NW—NNW 断裂构造发育,主要褶皱为新堡—力士山复背斜。受构造运动影响,区内北侧有大量的燕山期花岗岩,南侧为印支期、燕山期的闪长岩、石英闪长岩岩珠、岩脉零星分布(图 1 b)。

2 岩石学特征

玄武岩零星分布于甘肃省夏河县甘加乡作海村—麻当乡红墙一带,出露面积 10. 18 km²,玄武岩从甘加向麻当地区逐渐变厚,在喷发韵律较好的甘

加乡作海村开展了剖面测量(方向 218°),采集样品 15 件,麻当红墙地区通过路线调查采集样品 3 件,野外观察结合薄片鉴定认为火山岩岩性主要为黑色—灰黑色致密玄武岩(图 2 a),灰黑色、浅灰绿色、灰褐色杏仁状玄武岩,黑色蚀变玄武岩等,岩石具有斑状结构,块状构造、杏仁状构造,气孔多呈圆状—椭圆状,大小多介于 2 ~ 6 mm 之间,最大可达 1 cm,杏仁体自下至上逐渐减小,杏仁体主要为方解石、绿泥石(图 2 b)。在偏光显微镜下,黑色致密玄武岩主要由粒径截然的斑晶和基质组成,含微量杏仁体,岩石后期受到轻微的次生蚀变改造,岩石较致

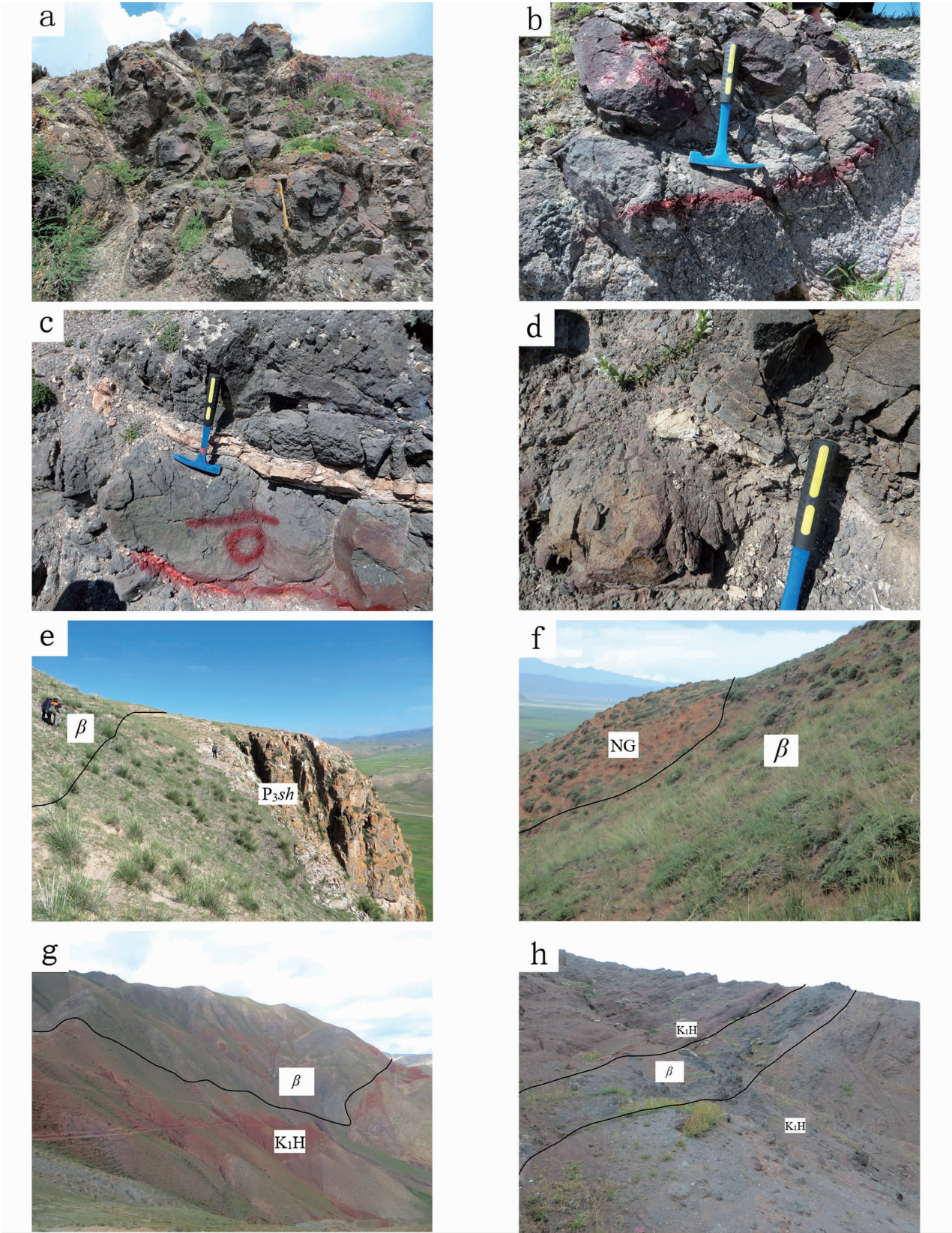


图 2 玄武岩野外照片及接触关系

Fig. 2 Basalt outcrop in the field

(a)甘加玄武岩露头;(b)杏仁状玄武岩与致密玄武岩;(c)玄武岩中的灰质白云岩;(d)玄武岩中的石棉夹层;(e)玄武岩与石关组(P_{3sh})
喷发不整合接触;(f)甘肃群(NG)与玄武岩角度不整合接触;(g)麻当地区玄武岩与河口群(K_1H)接触关系;(h)河口群中玄武岩熔岩层

密。斑晶 5%(斜长石微,橄榄石 5%),基质 95%(斜长石 80%,辉石 15%,金属矿物微),杏仁体不规则状,大小为 0.1 ~ 0.8 mm,多由绿泥石充填,个别由方解石充填。斑晶包括斜长石和橄榄石,斜长石具自形的长板条状、板状,晶体的长宽比值普遍大于 6:1,长轴大小主要介于 0.6 ~ 1.6 mm 间,聚片双晶发育。橄榄石完全滑石化和碳酸盐化,并具铁质环边,晶体大小在 0.8 ~ 1.5 mm,个别完全碳酸盐化。基质中斜长石具自形的长板条状,晶体的长宽比值普遍大于 5:1,大小主要介于 0.2 ~ 1.0 mm 间,杂乱分布。充填于斜长石晶体组成的空隙中的辉石不同程度被绿泥石交代,并有粉末状金属析出物,矿物大小主要在 0.02 ~ 0.1 mm 之间。根据人工重砂分析结果,金属矿物有钛铁矿、磁铁矿、黄铁矿、方铅矿及自然铜等,形态复杂,从自形粒状到它形粒状均有,大小在 0.02 ~ 0.1 mm 间,以单晶和集合体状存在。在玄武岩剖面中见有浅红色泥微晶灰质白云岩,具中薄层状构造,层厚 5 ~ 15 cm,呈不规则状产出(图 2 c);局部见石棉夹层,层厚 1 ~ 2 cm(图 2 d)。岩石呈溢流相,以熔岩被或熔岩流的形式产出,甘加玄武岩与下伏二叠系石炭组(P_3sh)呈不整合或断层接触(图 2 e),甘肃群(NG)和野狐城组(E_1y)不整合于其上(图 2 f)。在甘加乡南侧河口群(K_1H)复成份砾岩、砂岩地层中发现了玄武岩熔岩夹层(图 2 h),砾石多为杏仁状玄武岩,呈整合接触关系。麻当红墙玄武岩与下伏河口群(K_1H)呈整合接触,河口群砂岩、泥岩等未见有明显的蚀变。

3 岩石地球化学特征

本次对采集的 18 件玄武岩样品进行了全岩化学分析,样品加工、分析测试均由自然资源部兰州矿产资源检测中心(甘肃省中心实验室)完成,分析测试结果见表 1。

3.1 主量元素

从岩石化学成分看,火山岩的 SiO_2 含量介于 44.38% ~ 50.49% 之间,平均含量为 48.10%,属于基性玄武岩。 Al_2O_3 含量较高,介于 15.54% ~ 17.29% 之间,平均含量 16.29%。 MgO 含量为 4.00% ~ 6.46%,平均 5.39%, FeO^* 含量 8.43% ~ 10.27%,平均 9.52%; $Mg^{\#} = 44.23 \sim 54.74$,明显小于原生岩浆的 66 ~ 75。 TiO_2 含量 2.00% ~ 2.51%,明显高于岛弧火山岩(0.58% ~ 0.85%)和大陆拉斑玄武岩

(1.2%)^[16-17], K_2O 含量 0.37% ~ 1.63%, Na_2O 含量 2.25% ~ 3.74%,全碱含量 $ALK = 3.07 \sim 4.54$ 。采用 TAS 岩石分类图解(图 3 a),一件样品落入苦橄玄武岩,其余均落入玄武岩区,在 $Zr/TiO_2-Nb/Y$ 火山岩分类图解中(图 3 b),样品均落入碱性玄武岩区。根据火山岩(K_2O-Na_2O)- SiO_2 图解,样品大多数落入碱性系列(图 3 c)。火山岩根据岩石中钠、钾的相对含量可分为钠质和钾质类型,Irvine 等(1976)以火山岩中 $K_2O/Na_2O = 0.5$ 来划分钠、钾质,样品 $K_2O/Na_2O = 0.12 \sim 0.62$;Le Bas(1986)等以火山岩中 $Na_2O-2 \geq K_2O$ 为钠质类型,而 $Na_2O-2 \leq K_2O$ 为钾质类型^[18],大多数样品 $Na_2O-2 \geq K_2O$;根据 K_2O-Na_2O 图解,大部分样品落入钾质区,少数样品落入钠质区(图 3 d)。火山岩 CIPW 标准矿物含量见表 1,标准矿物出现紫苏辉石(H_y),说明形成透辉石之后有 FeO 、 MgO 剩余。玄武岩固结指数(SI)为 22.39 ~ 32.70,小于 40(幔源原始岩浆 SI 值为 40),说明岩浆分异好;分异指数(DI)为 28.39 ~ 39.36,说明岩浆分离结晶作用较小,基性程度较高。因此,说明甘加—麻当火山岩为一套碱性玄武岩,具有钾质—钠质过渡的性质。

3.2 微量元素

火山岩稀土、微量元素分析结果及主要参数见表 2,从表中可以看出火山岩稀土元素含量中等, $\Sigma REE = 105 \times 10^{-6} \sim 148.24 \times 10^{-6}$, $LREE = 89.00 \times 10^{-6} \sim 131.48 \times 10^{-6}$, $HREE = 15.89 \times 10^{-6} \sim 19.84 \times 10^{-6}$, $LREE/HREE = 5.24 \sim 7.85$,属轻稀土富集型, $\delta Eu = 0.94 \sim 1.06$,基本不存在 Eu 异常,说明岩浆岩化过程中没有发生斜长石的分离结晶作用。 $(La/Yb)_N = 5.76 \sim 11.5$,表明源区可能残留石榴石。 $\delta Ce = 0.83 \sim 0.98$,铈元素弱亏损,反映了火山岩形成于较低的氧逸度环境,稀土元素球粒陨石标准化模式图(图 4 a)中,曲线形态均为向右倾型,轻、重稀土分异明显,配分模式与典型的板内 OIB 型碱性玄武岩配分模式相似。

经原始地幔(Sun and McDonough,1989)标准化^[19],火山岩微量元素蛛网图总体呈隆起型分布(图 4 b),大离子亲石元素 Rb、W、Sr 和高场强元素 U、Nb、Ta、Hf 富集,Cs、Ba、Th 明显亏损,Ce、Zr 微弱亏损。K 大多数表现为正异常,少数表现为负异常,而 Sr 的富集可能与岩石快速冷凝相关。样品 $La/Nb = 0.81 \sim 1.02$,平均 0.87, $Zr/Nb = 5.34 \sim 6.27$,平均 5.77,这与 Weaver(1991)中洋岛玄武岩(OIB)不

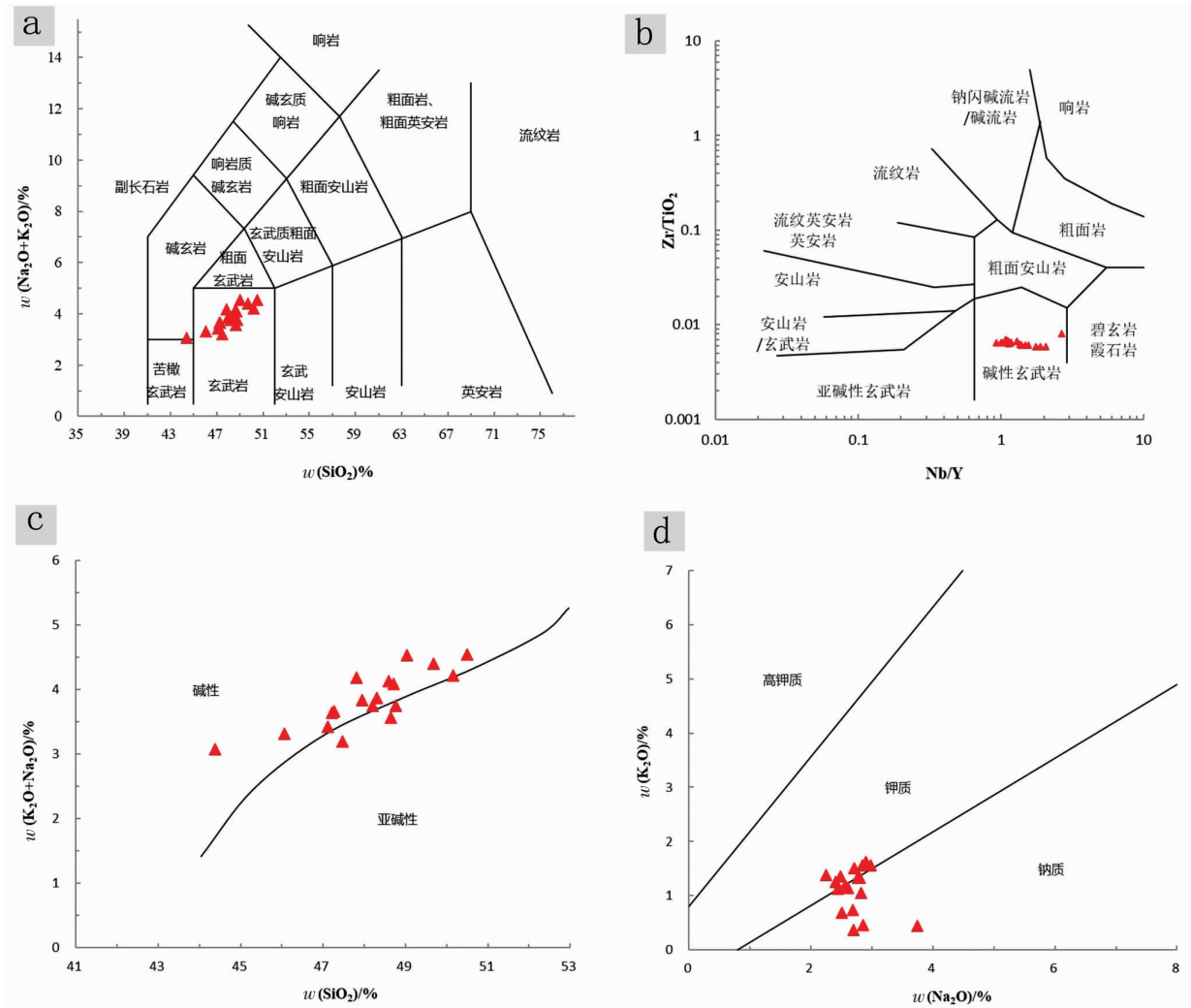


图 3 火山岩分类及系列划分图解

Fig. 3 Volcanic rock classification and series division

(a)火山岩TAS分类图解(Le Maitre R W (ed),1989);(b)火山岩岩石类型Nb/Y–Zr/TiO₂图解(Winchester,1977);
(c)火山岩(K₂O–Na₂O)–SiO₂图解(Hyndman, D.W. , 1985);(d)火山岩K₂O–Na₂O图解(E A K Middlemost,1972)

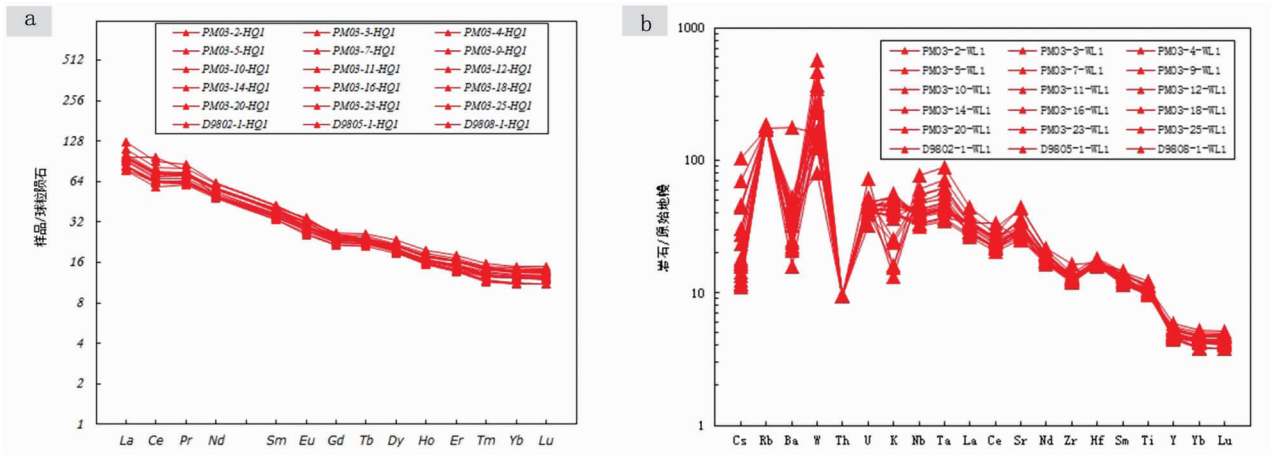


图 4 火山岩稀土元素球粒陨石标准化配分图解(a)与微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 4 Chondrite standardized distribution diagram of rare earth elements (a) and primitive mantle standardized spider diagram of trace elements (b)

表 1 玄武岩主量元素($w_B\%$)与CIPW 标准矿物(%)计算分析结果表
Table 1 Major elements and CIPW normative mineral calculation of basalt samples

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O ⁺	LOI	ALK	K ₂ O/Na ₂ O	Mg [#]
PM03-2-HQ1	48.76	2.01	16.20	3.36	6.90	0.275	5.91	8.58	1.14	2.61	0.465	0.14	3.22	98.88	3.88	0.44	48.99
PM03-3-HQ1	48.65	2.00	16.38	2.89	7.06	0.279	6.16	8.58	1.13	2.44	0.463	0.47	4.18	99.98	3.70	0.47	42.62
PM03-4-HQ1	48.20	2.03	16.53	2.31	8.22	0.209	5.13	9.12	1.19	2.56	0.447	0.50	3.48	99.10	3.90	0.46	45.87
PM03-5-HQ1	50.49	2.07	17.25	1.72	7.45	0.152	4.19	9.24	1.56	2.98	0.444	0.20	2.96	99.96	4.64	0.52	54.91
PM03-7-HQ1	47.94	2.10	16.76	2.26	8.23	0.170	4.72	9.60	1.36	2.48	0.492	0.34	3.75	99.38	3.98	0.55	48.34
PM03-9-HQ1	47.21	2.28	16.14	2.36	8.35	0.161	5.92	8.20	1.39	2.25	0.548	0.44	4.86	99.27	3.82	0.62	41.03
PM03-10-HQ1	47.26	2.17	16.84	2.26	8.40	0.165	5.39	9.04	1.26	2.40	0.511	0.70	4.08	99.64	3.82	0.53	43.62
PM03-11-HQ1	49.04	2.05	17.29	1.44	8.39	0.128	4.00	9.05	1.63	2.90	0.456	0.65	3.46	99.65	4.69	0.56	46.64
PM03-12-HQ1	49.69	2.08	17.03	2.32	7.38	0.158	4.63	8.92	1.56	2.84	0.468	0.26	3.26	99.86	4.52	0.55	51.87
PM03-14-HQ1	48.72	2.16	16.30	2.22	8.05	0.171	5.03	8.97	1.33	2.76	0.475	0.26	3.82	99.46	4.24	0.48	51.82
PM03-16-HQ1	48.60	2.17	16.03	2.62	8.42	0.237	4.96	9.18	1.33	2.80	0.517	0.56	3.00	99.58	4.25	0.47	51.66
PM03-18-HQ1	48.31	2.26	16.06	3.10	7.71	0.226	5.24	9.09	1.05	2.82	0.557	0.32	3.96	99.93	4.00	0.37	50.36
PM03-20-HQ1	50.16	2.05	16.91	2.76	6.65	0.269	5.36	8.38	1.51	2.71	0.515	0.38	3.78	100.77	4.33	0.56	49.69
PM03-23-HQ1	47.47	2.37	16.08	2.72	7.62	0.200	6.08	9.17	0.685	2.51	0.603	0.18	5.60	100.53	3.33	0.27	45.11
PM03-25-HQ1	47.12	2.40	15.58	4.04	6.09	0.392	6.46	9.34	0.732	2.69	0.728	0.62	4.66	100.24	3.56	0.27	46.41
D9802-1-HQ1	47.82	2.17	16.40	3.94	5.81	0.217	5.80	7.77	0.443	3.74	0.746	0.73	4.62	99.63	4.39	0.12	41.20
D9805-1-HQ1	44.38	2.51	15.54	4.75	6.13	0.132	6.00	10.24	0.373	2.70	0.636	2.14	2.74	97.66	3.28	0.14	40.00
D9808-1-HQ1	46.06	2.38	15.74	4.08	6.66	0.151	5.99	9.76	0.463	2.85	0.583	0.88	3.86	98.79	3.48	0.16	47.55

样品号	石英 (Q)	钙长石 (An)	钠长石 (Ab)	正长石 (Or)	A (碱性长石)	P (斜长石)	透辉石 (Di)	紫苏辉 石(Hy)	钛铁矿 (Il)	磁铁矿 (Mt)	磷灰石 (Ap)	黄铁矿 (Py)	方解石 (Cc)	固结指数 (SI)	分异指 数(DI)
PM03-2-HQ1	3.29	30.33	22.97	7.04	11.37	48.97	8.01	17.44	3.97	5.51	1.12	0	0.32	30.17	33.3
PM03-3-HQ1	4.1	31.65	21.44	6.96	10.82	49.23	5.24	19.2	3.96	5.26	1.12	0	1.07	31.87	32.5
PM03-4-HQ1	3.65	31.36	22.59	7.33	11.61	49.67	7.71	15.55	4.01	5.58	1.08	0	1.14	27.06	33.57
PM03-5-HQ1	4.02	29.9	25.87	9.47	15.69	49.55	10.4	9.71	4.04	5.08	1.06	0	0.46	23.96	39.36
PM03-7-HQ1	3.16	31.87	21.87	8.35	12.89	49.2	9.9	13.18	4.16	5.56	1.19	0	0.78	25.39	33.38
PM03-9-HQ1	3.83	31.5	20.09	8.64	12.96	47.27	3.9	19.43	4.58	5.69	1.34	0	1	29.89	32.56
PM03-10-HQ1	3.14	32.77	21.19	7.79	11.86	49.89	4.91	17.51	4.29	5.56	1.24	0.01	1.59	28.01	32.12
PM03-11-HQ1	3.56	30.39	25.43	9.95	16.22	49.55	7.22	11.4	4.04	5.43	1.1	0	1.48	22.39	38.94
PM03-12-HQ1	3.58	30.01	24.77	9.51	15.47	48.82	8.68	12.25	4.08	5.35	1.12	0.06	0.59	25.24	37.86
PM03-14-HQ1	3.25	29.32	24.32	8.2	13.52	48.32	9.77	13.53	4.27	5.58	1.15	0.01	0.59	26.54	35.77
PM03-16-HQ1	3.05	28.09	24.46	8.09	13.56	47.08	9.57	14.07	4.25	5.92	1.24	0	1.28	25.2	35.6
PM03-18-HQ1	3.03	29.13	24.75	6.46	10.95	49.39	9.55	14.79	4.45	5.77	1.34	0	0.73	26.84	34.24
PM03-20-HQ1	4.54	30.3	23.6	9.16	14.64	48.42	5.23	15.91	3.99	5.16	1.23	0.02	0.87	28.71	37.3
PM03-23-HQ1	3.57	32.11	22.29	4.25	6.86	51.79	8.3	17.57	4.73	5.31	1.47	0	0.41	31.65	30.11
PM03-25-HQ1	2.33	29.48	23.73	4.51	7.66	50.06	7.98	18.74	4.75	5.29	1.76	0.02	1.41	32.7	30.57
D9802-1-HQ1	1.54	27.96	33.21	2.75	5.72	58.2	2.22	19.06	4.32	5.47	1.81	0	1.66	29.72	37.5
D9805-1-HQ1	2.02	30.64	24.05	2.32	4.01	53	4.04	20.05	5.02	5.51	1.55	0	4.8	30.45	28.39
D9808-1-HQ1	1.5	30.2	25.33	2.87	5.07	53.33	8.92	17.45	4.75	5.56	1.42	0	2	30.33	29.7

注: $Mg^{\#} = 100 \times (MgO/40.31) / (MgO/40.31 + FeO^*/71.85)$; 固结指数(SI) = $MgO \times 100 / (MgO + FeO + Fe_2O_3 + Na_2O + K_2O)(w_B\%)$; 分异指数(DI) = $Qz + Or + Ab + Ne + Lc + Kp$

表 2 玄武岩稀土与微量元素分析结果表 (×10⁻⁶)

Table 2 Rare earth element and trace elements analysis results of basalt samples (× 10⁻⁶)

样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	δEu	δCe
PM03-2-XT1	23.1	59.78	7.29	23.5	5.3	1.68	4.82	0.84	5.11	0.96	2.56	0.35	2.22	0.33	23	137.76	7.01	7.46	0.99	1.12
PM03-3-XT1	18.2	36.04	5.73	22.4	5.13	1.54	4.47	0.82	4.96	0.94	2.51	0.34	2.16	0.33	22.4	105.53	5.39	6.03	0.96	0.86
PM03-4-XT1	18.8	38.59	5.89	23.3	5.29	1.62	4.78	0.87	5.36	1.02	2.74	0.37	2.34	0.35	24.9	111.3	5.24	5.76	0.97	0.89
PM03-5-XT1	23.1	44.92	7	26.9	5.93	1.75	5.14	0.91	5.45	1.02	2.72	0.37	2.39	0.36	24.3	127.9	5.97	6.92	0.94	0.86
PM03-7-XT1	19.6	38.53	6.04	23.5	5.46	1.69	4.86	0.88	5.38	1	2.68	0.36	2.28	0.34	23.6	112.58	5.33	6.17	0.98	0.86
PM03-9-XT1	21.7	42.82	6.76	26.2	6.12	1.86	5.43	0.98	5.99	1.12	2.98	0.4	2.55	0.38	26.5	125.25	5.31	6.08	0.97	0.86
PM03-10-XT1	19.8	39.17	6.12	24.1	5.57	1.72	4.89	0.89	5.4	1.01	2.69	0.36	2.32	0.35	24.1	114.35	5.38	6.12	0.99	0.87
PM03-11-XT1	23.4	45.61	7.03	26.9	6.05	1.81	5.26	0.94	5.58	1.06	2.83	0.38	2.48	0.36	25.1	129.68	5.86	6.76	0.96	0.86
PM03-12-XT1	20	39.54	6.05	23	5.11	1.49	4.4	0.79	4.74	0.89	2.36	0.32	2.08	0.31	21.3	111	5.99	6.87	0.94	0.87
PM03-14-XT1	19.8	38.59	6.02	23.3	5.34	1.6	4.61	0.83	4.96	0.92	2.42	0.32	2.08	0.3	21.6	111.09	5.76	6.83	0.96	0.86
PM03-16-XT1	19.7	38.63	6.05	23.3	5.31	1.62	4.68	0.83	5.07	0.93	2.48	0.33	2.09	0.31	21.9	111.4	5.66	6.78	0.97	0.86
PM03-18-XT1	21.3	41.27	6.38	24.9	5.65	1.73	4.93	0.86	5.12	0.94	2.47	0.33	2.11	0.32	22.4	118.29	5.93	7.25	0.98	0.86
PM03-20-XT1	22.7	44.53	6.89	26.3	5.86	1.73	5.1	0.9	5.35	1	2.69	0.36	2.35	0.35	24	126.19	5.97	6.95	0.94	0.86
PM03-23-XT1	23.1	44.88	6.89	26.4	6.15	2.01	5.17	0.89	5.15	0.95	2.51	0.33	2.11	0.31	22.2	126.92	6.29	7.84	1.06	0.86
PM03-25-XT1	24.1	46.31	7.08	27	6.07	1.83	5.06	0.86	4.94	0.9	2.32	0.3	1.89	0.28	20.8	128.94	6.79	9.15	0.98	0.86
D9802-1-XT1	30.2	55.25	8.1	29.5	6.51	1.94	5.38	0.88	4.88	0.88	2.28	0.29	1.88	0.28	20.4	148.24	7.85	11.49	0.98	0.85
D9805-1-XT1	26.3	49.65	7.56	28.7	6.37	1.94	5.37	0.89	5.06	0.91	2.36	0.3	1.93	0.28	21.1	137.62	7.04	9.79	0.99	0.85
D9808-1-XT1	22.7	44.02	6.78	26.1	5.9	1.83	5.06	0.89	5.13	0.96	2.49	0.33	2.1	0.31	22.2	124.55	6.21	7.74	1	0.86

样品号	Sr	Nb	Cs	W	U	Ta	Sc	Ba	V	Cr	Co	Ni	Ga	Th	Rb	La/Nb	Zr/Nb
PM03-2-WL1	523	23.7	3.27	4.97	0.84	1.51	380	152	3.6	172	46.2	111	18.6	0.8	115	0.98	5.71
PM03-3-WL1	538	22.4	1.29	3.25	0.83	1.44	419	146	3.6	170	48.0	123	19.2	0.8	115	0.81	5.97
PM03-4-WL1	557	23.2	1.17	2.97	0.92	1.49	411	110	3.6	172	43.9	101	18.4	0.8	115	0.81	5.83
PM03-5-WL1	621	27.2	0.89	5.25	1.01	1.74	410	300	3.6	130	36.6	34.8	19.8	0.8	115	0.86	5.34
PM03-7-WL1	654	27.6	2.16	4.79	0.84	1.80	430	159	3.6	142	44.6	93.9	19.6	0.8	115	0.83	6.13
PM03-9-WL1	610	30.1	1.24	2.96	0.97	1.96	375	318	3.6	128	48.7	98.8	18.8	0.8	116	0.83	5.80
PM03-10-WL1	652	28.4	0.97	2.59	0.85	1.82	409	176	3.6	139	48.7	96.7	17.9	0.8	114	0.82	6.04
PM03-11-WL1	665	27.2	0.79	6.90	0.85	1.75	458	309	3.6	131	40.4	47.1	19.0	0.8	116	0.87	5.44
PM03-12-WL1	596	27.5	1.02	7.33	1.00	1.77	385	257	3.6	132	38.5	50.6	19.6	0.8	117	0.87	6.27
PM03-14-WL1	589	29.2	0.84	7.42	0.95	1.87	398	167	3.6	154	43.0	104	19.2	0.8	114	0.85	5.96
PM03-16-WL1	609	30.6	1.20	9.26	0.98	1.95	409	246	3.6	171	44.9	130	19.5	0.8	115	0.85	5.85
PM03-18-WL1	671	33.2	1.95	5.12	0.90	2.11	417	226	3.6	164	45.0	133	19.5	0.8	111	0.86	5.72
PM03-20-WL1	586	26.5	0.82	3.35	0.68	1.69	393	295	3.6	129	40.9	48.9	19.0	0.8	117	0.86	5.47
PM03-23-WL1	763	34.7	4.99	3.23	0.83	2.29	396	1240	3.6	181	46.2	183	17.7	0.8	111	0.87	5.69
PM03-25-WL1	730	39.5	7.40	4.56	1.08	2.56	393	368	3.6	196	48.8	210	18.8	0.8	108	0.89	5.48
D9802-1-WL1	910	54.6	3.12	2.48	1.53	3.66	327	337	3.6	127	40.8	97.5	18.7	0.8	108	1.02	6.20
D9805-1-WL1	941	43.4	1.65	1.59	1.09	2.91	478	294	3.6	160	49.7	148	19.1	0.8	109	0.92	5.45
D9808-1-WL1	745	38.8	1.12	11.36	0.85	2.55	443	277	3.6	167	49.8	148	19.2	0.8	109	0.87	5.59

注:轻稀土 LREE(La-Eu),重稀土 HREE(Gd-Lu)

相容元素 La/Nb、Zr/Nb 比值相似^[20], Nb、Ta 的强烈富集特征显示了明显的板内 OIB 型源区特征。

4 玄武岩形成时代探讨

本次工作采集 PM03-25-T1 玄武岩样品开展锆石 U-Pb 年龄测定, 最终未能成功获得有效谐和年龄。根据前文众多学者观点, 甘加—麻当玄武岩的成岩年龄主要分三种, 1:25 万临夏幅区域地质调查报告中取得锆石 U-Pb 定年结果为 (267.6 ± 5) Ma, 形成时代为中二叠世^①; 丁一等通过锆石 U-Pb 及李小伟等通过玄武岩基质玻璃进行 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年, 确定玄武岩形成年龄为早白垩世^[5,21]; 赖绍聪等认为麻当玄武岩其形成时代为新生代^[15]。

1:25 万临夏幅地质报告中根据河口群中所获孢粉化石组合将其确定为早白垩世, 在甘加乡南侧河口群复成份砾岩、砂岩地层中发现了玄武岩熔岩层(图 2 h), 层厚 1~2 m, 见 3 层玄武岩熔岩层, 说明在早白垩世亦有火山活动进行, 且火山活动存在间歇, 河口群砾岩中含有大量的杏仁状玄武岩砾石。甘加玄武岩喷发不整合于下伏的二叠系石关组地层之上, 同时在河口群砾岩中发现玄武岩熔岩层, 其上与甘肃群(NG)呈不整合接触, 而麻当地区玄武岩整合于下白垩统河口群地层之上。根据野外地层层序关系及河口群熔岩层特征, 本文认为甘加—麻当玄武岩形成时代定为白垩世。这与丁一、李小伟等认为麻当红墙玄武岩属于早白垩世—晚白垩世早期的观点基本一致。对于 1:25 万临夏幅区域地质调查报告中锆石 U-Pb 定年结果显示为 (267.6 ± 5) Ma, 认为该锆石并非岩浆结晶锆石, 可能是捕获的早期锆石。而赖绍聪等(2007)认为麻当玄武岩其形成时间为新生代, 与麻当玄武岩晚白垩—新生代时期其板块汇聚环境及其岩浆的结晶分异和演化等过程有关。

5 玄武岩的成因及构造意义

火山岩 TiO_2 含量为 2.00%~2.51%, 平均 2.18%, 明显高于岛弧区火山岩(0.58%~0.85%)和典型的大洋中脊拉斑玄武岩(1.5%), 而与板内 OIB 型碱性玄武岩(2.20%)含量接近^[17]。火山岩的稀土元素配分模式及微量元素蛛网图与典型的板内 OIB 型碱性玄武岩相似, 强烈富集大离子亲石元素 Rb、W、Sr 和高场强元素 U、Nb、Ta、Hf, 显示了明显

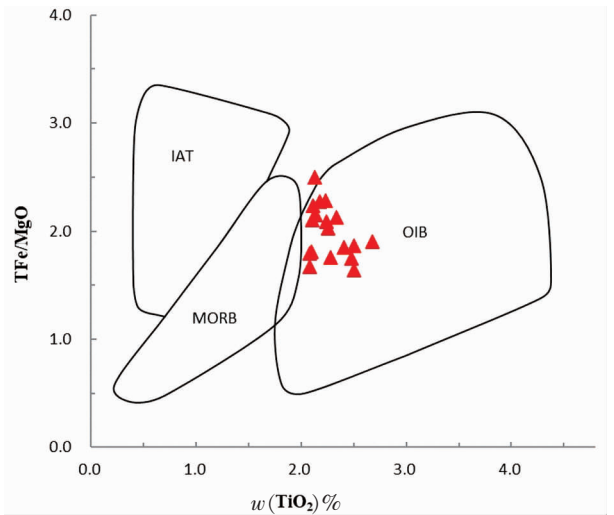


图 5 玄武岩 TFe/MgO-TiO₂ 成因判别图解

Fig. 5 TFe/MgO-TiO₂ diagram of basalts samples

的板内 OIB 型源区特征, 在火山岩 TFe/MgO-TiO₂ 的成因判别图解(图 5)中, 样品全部落入 OIB 区, 两者结果一致。在玄武岩 Ti/100-Zr-3Y 构造环境判别图解(图 6 a)以及 Zr/Y-Zr 构造环境判别图解(图 6 b)中^[22-23], 样品全部落入板内玄武岩区; 在玄武岩 2Nb-Zr/4-Y 构造环境判别图解(图 6 c)中^[24], 样品全部落入板内碱性玄武岩, 而在玄武岩 TiO₂-K₂O-P₂O₅ 构造环境判别图解(图 6 d)中^[25], 样品均落入非大洋环境, 本文认为玄武岩形成于大陆板内环境, 与李小伟等、黄雄飞等、丁一等、赖绍聪等学者认为玄武岩形成环境为大陆裂谷环境, 具有典型的板内 OIB 型特征^[4-5,15,21]观点一致。

OIB 型玄武岩成因通常与地幔柱活动、岩石圈的伸展以及大陆裂谷关系密切^[5], 已有研究表明, 至少在印支期华北板块与扬子板块沿中央造山系就已经发生碰撞造山作用, 完成中国大陆的主体拼合过程, 三叠纪之后的中生代中国大陆主体进入陆内构造演化阶段^[26]。研究区在晚燕山期曾发生广泛的板内伸展构造作用, 形成广布分散的白垩纪—新近纪伸展断陷红色陆相盆地, 并且常常是沿走滑断裂呈斜列式分布的剪切拉分盆地, 同时, 伸展环境致使岩石圈拉伸减薄, 从而导致软流圈地幔物质上涌, 形成岩浆活动。板内玄武岩源区复杂, 演化、形成过程中受多种因素影响, 其岩石学、岩石地球化学特征亦表现多样^[27-28]。研究表明, 甘加—麻当玄武岩既有钾质拉斑玄武岩, 亦有钠质碱性玄武岩, 同

① 中国地质大学(武汉), 1:25 万临夏幅区域地质调查报告, 2006

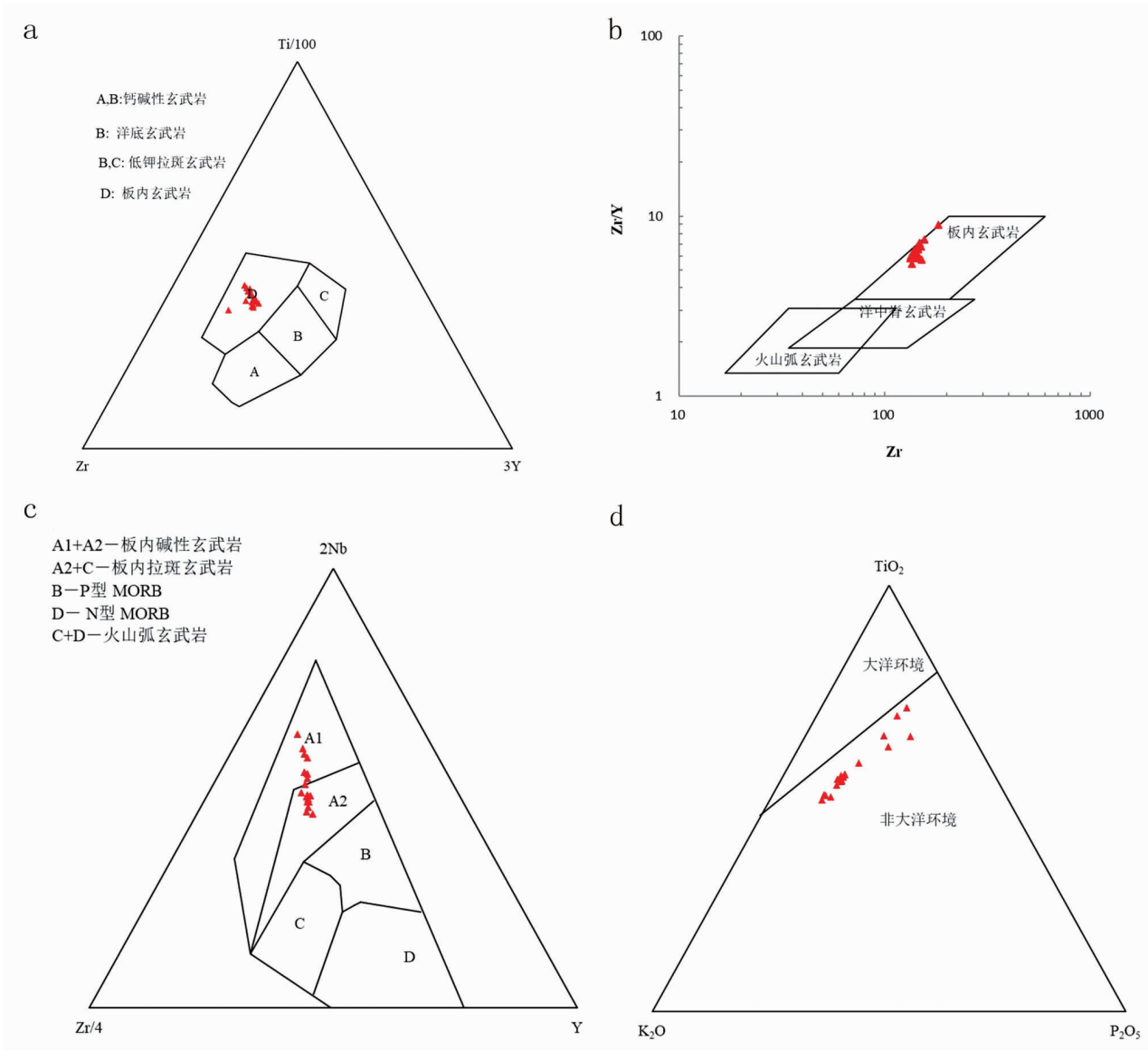


图 6 玄武岩构环境判别图解

Fig. 6 Discrimination of structural environment for basalt
(a)玄武岩Ti/100–Zr–3Y构造环境判别图解;(b)玄武岩Zr/Y–Zr构造环境判别图解;
(c)玄武岩2Nb–Zr/4–Y构造环境判别图解;(d)玄武岩TiO₂–K₂O–P₂O₅构造环境判别图解

时亦具有钠质向钾质过渡的特征,碱性玄武岩的地球化学特征暗示其主要受软流圈地幔源区控制,而较低的 $La/Nb(0.81 \sim 1.02)$ 比值以及拉斑玄武岩可能暗示岩浆经历了较为强烈的岩石圈—软流圈相互作用^[29],这与丁一等、赖绍聪等认为玄武岩可能起源于具有 EM II 特征的软流圈地幔部分熔融观点一致。

6 结论

(1)甘加—麻当玄武岩为一套钾质—钠质过渡的碱性玄武岩,是典型的裂隙式喷发熔岩,岩石的

TiO_2 含量为 2.00% ~ 2.51%,稀土元素配分模式及微量元素蛛网图与典型的板内 OIB 型碱性玄武岩相似,具有典型的板内 OIB 型源区特征。

(2)玄武岩形成于白垩纪造山运动后期的岩石圈伸展环境,可能起源于软流圈地幔的部分熔融,并且经历了较为强烈的岩石圈—软流圈相互作用。

参 考 文 献

[1] 张国伟,郭安林,董云鹏,等. 关于秦岭造山带[J]. 地质力学学报,2019,25(05):746–768
[2] 张国伟,郭安林,姚安平. 中国大陆构造中的西秦岭—松潘大陆构造结[J]. 地学前缘,2004,11(03):23–32

- [3] 冯益民,曹宣铎,张二朋,等. 西秦岭造山带结构造山过程及动力学[M]. 西安:西安地图出版社,2002:1-263
- [4] 黄雄飞,喻学惠,莫宣学,等. 西秦岭甘加地区 OIB 型钾质拉斑玄武岩的发现:对西秦岭晚中生代大陆裂谷作用的启示[J]. 地质前缘,2013,20(03):204-216
- [5] 丁一. 西秦岭麻当地区玄武岩的地球化学特征[A]. 中国矿物岩石地球化学学会第 13 届学术年会论文集[C]. 中国矿物岩石地球化学学会,2011:1
- [6] 丁一. 青藏高原东北缘红墙火山岩的岩石学、地球化学、年代学特征及其成因探讨[D]. 北京:中国地质大学(北京),2013
- [7] 丁一,喻学惠,莫宣学,等. 青藏高原东北缘红墙玄武岩的年代学、地球化学特征及成因初探[J]. 地质前缘,2013,20(03):180-191
- [8] 汤庆艳,张铭杰,李晓亚,等. 西秦岭新生代高钾质玄武岩流体组成及其地幔动力学意义[J]. 岩石学报,2012,28(04):1251-1260
- [9] 祁生胜,邓晋福,陈健,等. 青海省同仁地区早白垩世大陆裂谷环境火山岩的确定及意义[J]. 西北地质,2012,45(01):20-32
- [10] 赵文婷. 青藏高原东北缘晚中生代玄武岩岩石学地球化学及其成因[D]. 北京:中国地质大学(北京),2009
- [11] 董云鹏,张国伟,杨钊,等. 西秦岭武山 E-MORB 型蛇绿岩及相关火山岩地球化学[J]. 中国科学(D 辑:地球科学),2007(S1):199-208
- [12] 李晓勇,范立勇. 西秦岭地区晚中生代 OIB 型玄武岩的发现及其意义[J]. 中山大学学报(自然科学版),2006,45(03):127-128
- [13] 范立勇. 西秦岭中生代玄武岩地球化学特征及构造意义[A]. 构造地质学新理论与新方法学术研讨会论文摘要集[C]. 北京大学地球与空间科学学院,2006:2
- [14] 甘肃省地质矿产局. 甘肃省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1989
- [15] 赖绍聪,张国伟,李永飞,等. 青藏高原东缘麻当新生代钠质碱性玄武岩成因及其深部动力学意义[J]. 中国科学(D 辑:地球科学),2007,37(Z1):271-278
- [16] Pearce J A. The role of sub-continental lithosphere in magmagenesis at destructive plate margins[M]//Hawkesworth C J. Norry MJ. Continental Basalts and Mantle Xenoliths. Nantwich: Shiva,1983:230-249
- [17] 徐夕生,邱检生主编. 火成岩岩石学[M]. 北京:科学出版社,2010
- [18] Le Bas M J,Le Maitre R W. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. Journal of Petrology,1986,27(3):745-750
- [19] Sun S S and Mc Donough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[M]// Saunders AD, Norry MJ. Magmatism in the Ocean Basin. London: Geological Society Special Publications, 1989,42:313-345
- [20] 李小伟,丁一,黄雄飞,等. 西秦岭晚中生代陆内碱性岩浆作用:来自全岩基质激光 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄的约束[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2015,45(增刊 1):1503-22
- [21] Weaver,B.L. (1991) The Origin of ocean island basalt end-Member compositions: trace element and isotopic constraints[J]. Earth and Planetary Science Letters,104,381-397
- [22] Pearce J A and Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. Earth and Planetary Science Letters,1973,19:290-300
- [23] Pearce J A and Norry M J. Petrogenetic Implications of Ti,Zr, Y, and Nb Variations in Volcanic Rocks[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology,1979,69:33-47
- [24] Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. Chemical Geology,56,207-218
- [25] T H Pearce,B E Gorman T C Birkett. The TiO_2 - K_2O - P_2O_5 diagram:a method of discriminating between oceanic and non-oceanic basalts[J]. Earth Planet. Sci. Lett. ,1975,24:419-426
- [26] 何友翔,何彤彤,赵玮,等. 西秦岭合作—美武地区侏罗纪郎木寺组火山岩地球化学特征及构造环境浅析[J]. 甘肃地质,2017,26(02):23-30
- [27] 王金荣,潘振杰,张旗,等. 大陆板内玄武岩数据挖掘:成分多样性及在判别图中的表现[J]. 岩石学报,2016,32(07):1919-1933
- [28] 马金龙,徐义刚. 河北阳原和山西大同新生代玄武岩的岩石地球化学特征:华北克拉通西部深部地质过程初探[J]. 地球化学,2004,33 (01):75-88. DOI:10. 19700/j. 0379-1726. 2004. 01.010
- [29] 朱弟成,潘桂棠,莫宣学,等. 青藏高原中部中生代 OIB 型玄武岩的识别:年代学、地球化学及其构造环境[J]. 地质学报,2006,80(09):1312-1328

(下转第 58 页)

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND GENESIS OF BASALTS IN GANJIA–MADANG AREA, NORTHERN MARGIN OF WEST QINLING

LIANG Zhi-yong, LI Peng-ju, JIAO Shi-wen, LU You-peng

- (1. *Engineering Technology Research Center for Exploration and Comprehensive Utilization of Metal and Precious Metal Mineral Resources of Gansu Province, The Third Institute of Geology and Minerals Exploration, Gansu Provincial Bureau of Geology and Minerals Exploration and Development, Lanzhou 730050, China;*
2. *Gansu Remote Sensing Center for Geological Survey, Lanzhou 730050, China*)

Abstract: Volcanic rocks are scattered in the Gangjia and Madang areas of Xiahe County. Preliminary research shows that the Gangjia–Madang basalt belongs to a set of alkaline basalt with transition from sodium to potassium. The basalt is strongly enriched in large ion lithophile elements Rb, W, Sr and high field strength elements U, Nb, Ta, Hf, while deficient in Cs, Ba, Th elements, showing typical OIB characteristics. Its formation environment is continental plate environment, and it is speculated that the magma originated from the deficient asthenosphere mantle. The magma experienced a relatively strong lithosphere–asthenosphere interaction, which is related to the lithosphere stretching after the Indosinian orogeny.

Key words: basalt; geochemical characteristics; petrogenesis; west Qinling